

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ ІМЕНІ ІГОРЯ  
СІКОРСЬКОГО»**

Теплоенергетичний факультет

Кафедра автоматизації проектування енергетичних процесів і систем

"На правах рукопису"  
УДК 004.415.25

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

О.В. Коваль  
(підпис) (ініціали, прізвище)

“ ” \_\_\_\_\_ 2018р.

## Магістерська дисертація

зі спеціальності - 122 Комп'ютерні науки та інформаційні технології  
за спеціалізацією - Інформаційні технології моніторингу довкілля  
на тему: «Геометрична модель розповсюдження звуку в водному  
середовищі»

---

Виконав (-ла): студент (-ка) 6 курсу, групи ТМ-71мп  
Євтушенко Артем Михайлович  
(прізвище, ім'я, по батькові)

\_\_\_\_\_  
(підпис)

Науковий керівник доцент, к. т. н. Щербашин Ю. Д.  
(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

\_\_\_\_\_  
(підпис)

Рецензент \_\_\_\_\_  
(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

\_\_\_\_\_  
(підпис)

Засвідчую, що у цій магістерській дисертації  
немає запозичень з праць інших авторів без  
відповідних посилань.

Студент \_\_\_\_\_  
(підпис)

Київ - 2018

**Національний технічний університет України  
“Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського”**

Факультет теплоенергетичний

Кафедра автоматизації проектування енергетичних процесів і систем

Рівень вищої освіти другий, магістерський

зі спеціальності - 122 Комп'ютерні науки та інформаційні технології  
за спеціалізацією - Інформаційні технології моніторингу довкілля

ЗАТВЕРДЖУЮ  
Завідувач кафедри  
Коваль О.В.  
(прізвище, ініціали) \_\_\_\_\_ (підпис)  
«\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2018р.

**З А В Д А Н Н Я  
НА МАГІСТЕРСЬКУ ДИСЕРТАЦІЮ СТУДЕНТУ**

Євтушенку Артему Михайловичу  
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема дисертації Геометрична модель розповсюдження звуку в водному середовищі

Науковий керівник Щербашин Юрій Дмитрович к. т. н., доцент  
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по університету №\_\_ від “\_\_” \_\_\_\_\_ 20\_\_ року

2. Строк подання студентом дисертації \_\_\_\_\_

3. Об'єкт дослідження комп'ютерні інформаційні технології геометричного моделювання

4. Предмет дослідження комп'ютерні інформаційні технології геометричного моделювання для побудови моделі розповсюдження звуку в водному середовищі

5. Перелік питань, які потрібно розробити \_\_\_\_\_

- 1) проаналізувати особливості розповсюдження звуку в водному середовищі; \_\_\_\_\_
- 2) проаналізувати стан використання програмних рішень для побудови геометричної моделі розповсюдження звуку в водному середовищі; \_\_\_\_\_
- 3) розробити алгоритмічну модель для розв'язання задачі побудови геометричної моделі розповсюдження звуку в водному середовищі; \_\_\_\_\_
- 4) розробити програмне забезпечення для побудови геометричної моделі розповсюдження звуку в водному середовищі. \_\_\_\_\_

6. Орієнтований перелік ілюстративного матеріалу \_\_\_\_\_

1) Математична модель

2) Етапи роботи з програмою

3) Функції програмного забезпечення

4) Структура програмного забезпечення

5) Інтерфейс

7. Орієнтований перелік публікацій \_\_\_\_\_

1) Євтушенко А. М., Щербашин Ю.Д. “Використання методу планованого експерименту на прикладі спрощення формули Вільсона”

2) Євтушенко А. М., Щербашин Ю.Д. “Програма спрощення поліномів високого степеня на прикладі спрощення формули Вільсона”

8. Дата видачі завдання « 30 » вересня 2017 р.

### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Строки виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1	Отримання завдання	30.09.17р.	
2	Збір інформації	02.10.17р. – 15.01.18р.	
3	Аналіз вимог завдання, вибір методів і засобів розв’язання поставленої задачі	16.01.18р. – 02.09.18р.	
4	Підготовка публікацій	02.03.18р.	
5	Підготовка доповідей на конференції	20.04.18р.	
6	Підготовка дисертації	03.09.18р. – 10.05.18р.	
7	Розробка програмного продукту	02.09.18р. – 23.10.18р.	
8	Захист програмного продукту	24.10.18р.	
9	Передзахист	27.11.18р.	
10	Захист	17.12.18р.	

Студент

\_\_\_\_\_ ( підпис )

Євтушенко А. М.

\_\_\_\_\_ (прізвище та ініціали)

Науковий керівник

\_\_\_\_\_ ( підпис )

Щербашин Ю. Д.

\_\_\_\_\_ (прізвище та ініціали)



# РЕФЕРАТ

Обсяг роботи 60 аркушів, кількість ілюстрацій 23, таблиць 14, 2 додатки, 31 джерело за переліком посилань.

**Актуальність теми.** На сьогоднішній день триває розробка програмного забезпечення моделюючого комплексу гідроакустичних приладів, під час якої будуть використані результати даної роботи. Зазвичай геометричні моделі розповсюдження звуку у водному середовищі використовуються для дослідження розповсюдження звукових хвиль в морській воді для різних погодних та кліматичних умов, рельєфу морського дна. Складність моделювання полягає в анізотропності морського середовища по глибині, що веде до викривлення (рефракції) звукових променів.

**Мета дослідження** полягає в створенні геометричної моделі розповсюдження звуку в водному середовищі, яка відображатиме залежність траєкторії звукового променя від початкового кута випромінювання, та використанні створеної моделі для вирішення двоточної крайової задачі.

## **Задачі дослідження:**

- перевірити точність методу спрощення формули Вільсона до вигляду полінома 2-го степеня;
- на профілі швидкості звуку за глибиною занурення, виділити та дослідити ділянки з лінійною залежністю;
- вивести для кожного з виділених водних шарів формули залежності траєкторії звукового променя від початкових значень швидкості звуку та кута випромінювання;
- побудувати траєкторію звукового променя, використовуючи виведені формули для кожного водного шару, та застосувати отриману модель для розв'язання наступної двоточної крайової задачі: джерело звуку знаходиться на поверхні, розташування гідроакустичної станції (ГАС) задається користувачем програми; потрібно знайти початковий кут випромінювання, при якому звуковий промінь потрапить в ГАС.

**Об'єктом дослідження** є комп'ютерні інформаційні технології геометричного моделювання.

**Предметом дослідження** є комп'ютерні інформаційні технології геометричного моделювання для побудови моделі розповсюдження звуку в водному середовищі.

**Наукова новизна одержаних результатів.** Набуло подальшого розвитку застосування методу побудови траєкторії звукового променя для стратифікованого за швидкістю звуку водного середовища, за рахунок застосування даного методу до реальних даних, одержаних в результаті проведення експерименту з вимірювання швидкості звуку.

**Практичне значення одержаних результатів.** Програмне забезпечення може бути використане для розв'язання доточної крайової задачі в гідроакустиці з наступними умовами:

- джерело звуку знаходиться на поверхні моря;
- гідроакустична станція розташована на заданій відстані та глибині від джерела звуку;
- водне середовище поділене на 4 водних шари, для кожного з яких є характерною лінійна залежність швидкості звуку від глибини занурення;
- необхідно знайти кут випромінювання, при якому звуковий промінь потрапить в ГАС.

**Публікації.** Євтушенко А.М., Щербашин Ю.Д. Використання методу планованого експерименту на прикладі спрощення формули Вільсона. – К. : 7 КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. – Матеріали XVI Міжнародної науково-практичної конференції аспірантів, магістрантів і студентів «Сучасні проблеми наукового забезпечення енергетики», м. Київ – Т. 2. – с. 216 / ISBN 978-966-622-888-1.

**Ключові слова:** швидкість звуку, спрощення формули Вільсона, профіль швидкості звуку за глибиною, лінійна залежність, траєкторія звукового променя, кут випромінювання, двоточкова крайова задача.

# ABSTRACT

The volume of work 60 sheets, the number of illustrations 23, tables 14, 2 annexes, 31 source by the list of references.

**Actuality of theme.** To date, the software development of the modeling complex of hydroacoustic devices is under development, during which the results of this work will be used. Typically, geometric models of sound propagation in the aquatic environment are used to study the propagation of sound waves in seawater for different weather and climatic conditions, and the seabed relief. The complexity of simulation is the anisotropy of the marine environment in depth, which leads to distortion (refraction) of sound beams.

**The aim of the study** is to create a geometrical model for the propagation of sound in a water environment, which will reflect the dependence of the trajectory of the sound beam on the initial emission angle, and the use of the created model for solving the two-point boundary-value problem.

## **Research objectives:**

- verify the accuracy of the method of simplifying the Wilson formula in the form of a polynomial of degree 2;
- on the profile of sound velocity at the depth of immersion, to isolate and explore areas with linear dependence;
- To deduce for each of the selected water layers the formula of the dependence of the trajectory of the sound beam on the initial values of the speed of sound and the angle of emission;
- construct the trajectory of the sound beam using the derived formulas for each water layer, and apply the resulting model to solve the next two-point boundary value problem: the sound source is on the surface; the location of the hydroacoustic station (HAS) is set by the user of the program; you need to find the initial angle of emission, in which the sound ray gets into the HAS.

**The object of research** is the computer information technology of geometric modeling.

**The subject of the study** is the computer information technology of geometric modeling for the construction of a model for the propagation of sound in a water environment.

**Scientific novelty of the obtained results.** The further development of the application of the method of constructing a sound beam trajectory for stratified sound velocity of the aqueous medium has been further developed, due to the application of this method to real data obtained as a result of an experiment on measuring the speed of sound.

**The practical value of the results.** The software can be used to solve the focal point problem in hydroacoustics with the following conditions:

- the source of sound is on the surface of the sea;
- the hydroacoustic station is located at a given distance and depth from the sound source;
- the aqueous medium is divided into 4 aqueous layers, for each of which there is a characteristic linear dependence of the speed of sound from the depth of immersion;
- it is necessary to find the angle of emission, in which the sound beam enters the HAS.

**Publications.** Yevtushenko A.M, Shcherbashin Yu.D. Using the method of a planned experiment on an example of simplification of the Wilson formula. - K.: 7 KPI them. Igor Sikorsky, 2018. - Materials of the XVIII International Scientific and Practical Conference of Postgraduates, Graduates and Students "Modern Problems of Scientific Supply of Power Engineering", Kyiv - T. 2. - p. 216 / ISBN 978-966-622-888-1.

**Keywords:** speed of sound, simplification of Wilson's formula, depth sound profile, linear dependence, trajectory of sound beam, angle of emission, two-point boundary value problem.



# ЗМІСТ

Вступ.....	9
1. Задачі для програмної реалізації.....	11
1.1 Задача перевірки точності методу спрощення формули Вільсона.....	12
1.2 Задача виділення на профілі швидкості звуку ділянок з лінійною залежністю.....	13
1.3 Задача виведення формул залежності траєкторії звукового променя від початкових значень.....	13
1.4 Двоточкова крайова задача.....	14
1.5 Висновки.....	14
2. Огляд предметної області.....	16
2.1 Швидкість звуку як головний фактор при побудові траєкторії звукового променя.....	16
2.2 Метод планування експерименту.....	18
2.3 Порівняння теорії нормальних хвиль з променевою теорією.....	19
2.4 Висновки.....	20
3. Обчислювальні методи програмної системи.....	21
3.1 Розрахунки, необхідні для перевірки методу спрощення формули Вільсона.....	21
3.2 Розрахунок градієнтів зміни швидкості звуку за глибиною занурення.....	23
3.3 Виведення формул залежності траєкторії звукового променя від початкових значень.....	23
3.4 Використання виведених формул для побудови траєкторії звукового променя.....	28
3.5 Алгоритми роботи програми.....	29
3.6 Висновки.....	32
4. Опис програмної реалізації.....	33
4.1 Архітектура системи.....	33

4.2 Інтерфейс програми для перевірки методу спрощення формули Вільсона.....	34
4.3 Інтерфейс програми для побудови траєкторії звукового променя.....	37
4.4 Висновки.....	46
5. Розроблення стартап-проекту.....	48
5.1 Резюме проекту.....	48
5.2 Організація проекту.....	48
5.3 Канва бізнес-моделі проекту.....	49
5.4 Ключові види діяльності проекту.....	49
5.5 Ціннісні пропозиції та споживачі.....	50
5.6 Взаємовідносини зі споживачами та канали збуту.....	52
5.7 Обґрунтування ресурсів та витрат проекту.....	53
5.8 Грошовий потік та оцінка вартості проекту.....	54
5.9 Висновки.....	55
Висновки.....	56
Список використаних джерел.....	58
ДОДАТОК А.....	61
ДОДАТОК Б.....	65

## ВСТУП

Наука, що вивчає випромінювання, розповсюдження, поглинання, розсіювання, відбивання звуку в водному середовищі називається гідроакустикою [1].

Розповсюдження звуку можна математично описати у вигляді розв'язання хвильового рівняння з урахуванням граничних умов та особливостей середовища в окремому випадку. Існує два теоретичних підходи до розв'язання хвильового рівняння. Перший з них базується на теорії нормальних хвиль або хвильовій теорії, згідно з якою для опису розповсюдження звуку використовуються характеристичні функції, які називаються нормальними хвилями або модами, кожна з яких є розв'язком хвильового рівняння. Другим підходом є променева теорія, в основі якої лежить постулат про фронти хвиль, на яких фази мають постійні значення, та уявлення про обмежувальні промені для області розповсюдження акустичних коливань [2, 3].

На сьогоднішній день відомо, що причиною викривлень траєкторії звукового променя є зміна швидкості звуку. Досить великого практичного застосування набули формули Дель Гроссо (Del Grosso) [4] та Вільсона (Wilson) [5], які дозволяють отримати значення швидкості звуку, якщо відомі значення температури, солоності та гідростатичного тиску. Також з метою підвищення ефективності розрахунку швидкості звуку, продовжується вдосконалення рівнянь та методів її обчислення [6, 7]. Проте для розв'язку задач розповсюдження звуку більш важливою є залежність швидкості звуку від глибини – профіль швидкості звуку.

Відомо, що для ділянок профілю швидкості звуку, де спостерігається лінійна залежність, частини траєкторії звукового променя мають форму дуг кіл [8, 9]. Відповідно звуковий промінь проходить одну таку ділянку, утворюючи траєкторію у формі дуги кола, потім заломлюється і проходить наступну ділянку, формуючи траєкторію у вигляді дуги кола вже з іншими радіусом та центром. Таким чином водне середовище можна поділити на водні шари з лінійною залежністю швидкості звуку від глибини або, іншими словами, постійним градієнтом зміни швидкості

звуку за глибиною занурення. Для відображення заломлення звукового променя при переході з одного водного шару в інший використовується один з основних законів променевої теорії – закон Снеліуса (Snelius) [2].

В Східнокитайському морі був проведений експеримент з вимірювання швидкості звуку. Він полягав в тому, що прилад вимірювання плавно опускали від поверхні до глибини 87.8 м, а потім його так само плавно піднімали вгору, отримуючи приблизно кожні 0.08 с результати вимірювань властивостей морської води. Використовуючи дані, отримані в результаті проведеного експерименту, досить легко побудувати профіль швидкості звуку.

Внаслідок поєднання всіх вище перерахованих відомостей, виникла ідея побудови геометричної моделі розповсюдження звуку в водному середовищі, яка б відображала залежність траєкторії звукового променя від початкового кута випромінювання. Засобами програмного пакету MATLAB було розроблено програмне забезпечення для побудови геометричної моделі. Дана робота являє собою опис реалізації та використання розробленого програмного забезпечення.

## 1. ЗАДАЧІ ДЛЯ ПРОГРАМНОЇ РЕАЛІЗАЦІЇ

На сьогоднішній день триває розробка програмного забезпечення моделюючого комплексу гідроакустичних приладів, під час якої будуть використані результати даної роботи. Зазвичай геометричні моделі розповсюдження звуку у водному середовищі використовуються для дослідження розповсюдження звукових хвиль в морській воді для різних погодних та кліматичних умов, рельєфу морського дна. Складність моделювання полягає в анізотропності морського середовища по глибині, що веде до викривлення (рефракції) звукових променів.

Метою роботи є створення геометричної моделі розповсюдження звуку в водному середовищі, яка відображатиме залежність траєкторії звукового променя від початкового кута випромінювання, та використання створеної моделі для вирішення двоточної крайової задачі.

Під час виконання роботи необхідно вирішити наступні задачі:

- на основі даних, отриманих в результаті експерименту з визначення швидкості звуку, перевірити точність методу спрощення формули Вільсона до вигляду полінома 2-го степеня та побудувати профіль швидкості звуку за глибиною занурення;
- на профілі швидкості звуку за глибиною занурення, виділити та дослідити ділянки з лінійною залежністю;
- вивести для кожного з виділених водних шарів формули залежності траєкторії звукового променя від початкових значень швидкості звуку та кута випромінювання;
- побудувати траєкторію звукового променя, використовуючи виведені формули для кожного водного шару, та застосувати отриману модель для розв'язання наступної двоточної крайової задачі: джерело звуку знаходиться на поверхні, розташування гідроакустичної станції (ГАС) задається користувачем програми; потрібно знайти початковий кут випромінювання, при якому звуковий промінь потрапить в ГАС.

Об'єктом дослідження є комп'ютерні інформаційні технології геометричного моделювання.

Предметом дослідження є комп'ютерні інформаційні технології геометричного моделювання для побудови моделі розповсюдження звуку в водному середовищі.

## **1.1 Задача перевірки точності методу спрощення формули Вільсона**

Для розрахунку швидкості звуку в морській воді досить широке застосування має формула Вільсона, яка є функцією від температури, солоності та гідростатичного тиску. Для даної формули досить ефективним стало застосування методів теорії планування експерименту [10], в результаті якого для певної області значень формулу Вільсона можна замінити на спрощену емпіричну формулу у вигляді полінома 2-го степеня.

Вхідними даними є виміряні значення швидкості звуку, температури, солоності та густини для морської води на певній глибині, значення якої поступово змінюється від 0.4 м до 87.83 м. До вихідних даних належить максимальне відхилення між виміряною швидкістю звуку та обчисленою з використанням формули Вільсона. Також програма повинна передбачати можливість перевірки спрощеної емпіричної формули, отриманої для області дослідження, тому до вихідних даних також відноситься максимальне відхилення між виміряною швидкістю звуку та обчисленою за допомогою полінома 2-го степеня. Результати роботи програми мають показати, яка з формул дає більшу похибку порівняно з виміряними значеннями. Як окрему частину задачі можна виділити знаходження значень гідростатичного тиску, якщо для певної глибини відомі значення густини морської води.

## **1.2 Задача виділення на профілі швидкості звуку ділянок з лінійною залежністю**

Побудувавши профіль швидкості звуку за глибиною занурення, на ньому можна виділити ділянки з лінійною залежністю. Таким чином водне середовище поділиться на водні шари, під час проходження через кожен з яких траєкторія звукового променя набуватиме вигляду дуги кола з відповідними радіусом і центром. На основі даного поділу буде проводитись розрахунок градієнтів зміни швидкості звуку за глибиною.

До вхідних даних відноситься профіль швидкості звуку за глибиною занурення. Вихідними даними є значення глибини та швидкості звуку на межах виділених водних шарів. Програма повинна надавати можливість користувачу самостійно визначити та задати на профілі швидкості звуку межі водних шарів і відповідно стратифікувати водне середовище за швидкістю звуку. Також до вихідних даних відноситься таблиця з властивостями водних шарів: початкова швидкість звуку, кінцеве значення глибини, початковий кут входження звукового променя в даний водний шар і величина градієнту зміни швидкості звуку за глибиною занурення.

## **1.3 Задача виведення формул залежності траєкторії звукового променя від початкових значень**

В межах кожної з виділених ділянок з лінійною залежністю швидкості звуку від глибини, траєкторія звукового променя набуватиме форми дуги кола. Відповідно виникає задача знаходження рівняння цього кола.

До вхідних даних відноситься таблиця зі значеннями початкової швидкості звуку, кінцевої глибини, початкового кута входження звукового променя та градієнта швидкості звуку за глибиною для кожного з виділених водних шарів. Вихідними даними є значення радіусів та центрів кіл.

## 1.4 Двоточкова крайова задача

Отримавши формули для побудови траєкторії звукового променя в залежності від початкового кута випромінювання, можна побудувати геометричну модель розповсюдження звуку в водному середовищі, з урахуванням його стратифікації за швидкістю звуку та застосувати її для вирішення двоточної крайової задачі.

Вхідними даними є значення глибини від поверхні та відстані від джерела звуку, на якій розміщується ГАС. В нашому випадку розв'язуватиметься задача, коли джерело звуку знаходиться на поверхні і є початковою точкою відліку координат. До вихідних даних відноситься початковий кут випромінювання, при якому звуковий промінь влучить ГАС.

## 1.5 Висновки

1. Вивчена проблема побудови геометричної моделі розповсюдження звуку в водному середовищі, яка відображатиме залежність траєкторії звукового променя від початкового кута випромінювання, з подальшою можливістю використання створеної моделі для розв'язання доточної крайової задачі в гідроакустиці.

2. Сформульовані наступні завдання досліджень:

- перевірити точність методу спрощення формули Вільсона до вигляду полінома 2-го степеня;
- на профілі швидкості звуку за глибиною занурення, виділити та дослідити ділянки з лінійною залежністю;
- вивести для кожного з виділених водних шарів формули залежності траєкторії звукового променя від початкових значень швидкості звуку та кута випромінювання;
- побудувати траєкторію звукового променя, використовуючи виведені формули для кожного водного шару, та застосувати отриману модель для розв'язання наступної двоточної крайової задачі: джерело звуку



знаходиться на поверхні, розташування гідроакустичної станції (ГАС) задається користувачем програми; потрібно знайти початковий кут випромінювання, при якому звуковий промінь потрапить в ГАС.

3. Об'єктом дослідження є комп'ютерні інформаційні технології геометричного моделювання.

4. Предметом дослідження є комп'ютерні інформаційні технології геометричного моделювання для побудови моделі розповсюдження звуку в водному середовищі.

## 2. ОГЛЯД ПРЕДМЕТНОЇ ОБЛАСТІ

Швидкість звуку є основним фактором при побудові траєкторії звукового променя. Наводиться порівняння теорії нормальних хвиль з променевою теорією.

### 2.1 Швидкість звуку як головний фактор при побудові траєкторії звукового променя

Морська вода є середовищем де звук розповсюджується значно ефективніше, ніж в повітрі. Звукові хвилі, на відміну від електромагнітних, у водному середовищі можуть проходити десятки кілометрів без суттєвих затухань. Їхнє випромінювання, прийом та поширення в океанах, морях, озерах є корисним інструментом для підводної локації, зв'язку та інших цілей вивчення гідроакустики [11].

На розповсюдження звуку в морській воді впливають такі властивості, як температура, солоність та густина води. Якщо відомі значення цих величин для певної глибини, то досить легко знайти значення швидкості звуку для даної глибини.

Місцева швидкість звуку у воді може змінюватись в залежності від умов водного середовища, таких як солоність, гідростатичний тиск і температура, але вона не залежить від характеристик самого звуку — всі звукові хвилі розповсюджуються у воді з однаковою місцевою швидкістю. Зазвичай величина швидкості звуку в морській воді знаходиться в околі 1500 м/с.

Температура поверхні води змінюється в залежності від географічного положення, пори року та періоду дня. Розподіл температурного поля є дуже складним. Всередині водної маси зміна температури також має складний характер. При температурі води 5 °C, зміна температури всього на 1 °C дає зміну швидкості звуку на 4.5 м/с.

Солоність є мірою кількості солі та інших мінералів, розчинених в морській воді. Вона визначається загальною величиною твердої фази розчину, розчиненої в

морській воді в кількості 1 тисячної від її ваги та позначається в проміле (‰). Середня солоність морської води приблизно становить 35 ‰. Величина варіації швидкості звуку при зміні солоності на 1‰ приблизно становить 1.3 м/с.

Гідростатичний тиск також суттєво впливає на зміну швидкості звуку. Тиск є функцією глибини, і величина зміни швидкості звуку складає приблизно 1.6 м/с при зміні гідростатичного тиску на 1.013 МПа, тобто приблизно на кожні 100 м глибини. Гідростатичний тиск здійснює головний вплив на швидкість звуку на великих глибинах [12].

В Східнокитайському морі був проведений експеримент з вимірювання швидкості звуку, в результаті якого для певних значень глибини були виміряні значення швидкості звуку, температури, солоності та густини морської води. Виходячи з цих даних виникла ідея перевірки методу спрощення формули Вільсона до вигляду полінома 2-го степеня. Метод полягає в тому, щоб апроксимувати формулу Вільсона поліномом 2-го степеня на невеликій множині значень. Це дає змогу пришвидшити розрахунок швидкості звуку.

Порівняно з розрахунком швидкості звуку, для побудови гідроакустичних моделей більш важливим є профіль швидкості звуку, тобто залежність швидкості звуку від глибини занурення. Побудувавши профіль швидкості звуку для виміряних даних, стало помітно, що на ньому є ділянки, де залежність швидкості звуку від глибини занурення є дуже близькою до лінійної. Відповідно виникла потреба дослідити траєкторію звукового променя для ділянки профілю швидкості звуку з лінійною залежністю. Відомо, що траєкторія звукового променя в цьому випадку буде мати форму дуги кола. Таким чином, можна на основі виміряних даних відтворити водне середовище, яке потім стратифікувати за швидкістю звуку, поділивши його на водні шари, для яких характерна лінійна залежність швидкості звуку від глибини. В такому випадку траєкторія звукового променя буде сполученням дуг кіл. Для ділянок, де зміна швидкості звуку не лінійна, а дуже близька до лінійної, можна здійснити лінійну апроксимацію.

Отже швидкість звуку є головним фактором для побудови геометричної моделі розповсюдження звуку в водному середовищі.

## 2.2 Метод планування експерименту

В підході спрощення формули Вільсона, який перевіряється за допомогою вимірних даних, використовується метод планування експерименту. Розглянемо теоретичну основу даного методу.

Множина всіх точок в  $k$ -вимірному просторі, координати яких є комбінаціями “+” і “-”, називається повним факторним планом або планом повного факторного експерименту типу  $2^k$  (ПФЕ). Кількість точок в даному плані  $N=2^k$ . Число  $N$  являє собою ядро плану [13, 14].

Існують різні підходи до побудови планів другого порядку. Відповідно до ідеї покрокового експерименту планування раціонально здійснювати шляхом додавання спеціально підібраних точок до ядра, утвореного плануванням для лінійного наближення. Такі плани називаються композиційними (послідовними), вони дозволяють використовувати інформацію, отриману в результаті реалізації лінійного плану [15].

Композиційні плани зазвичай використовуються на заключному етапі дослідження, коли модель потрібно підбирати послідовно, починаючи з найпростішого лінійного рівняння, яке потім добудовується до повної квадратичної формули. В цьому випадку композиційні плани дають вигоду за числом дослідів порівняно з іншими планами. Ці плани можна використовувати при безпосередній побудові функцій у вигляді поліномів.

Вирішення подібних задач засновано на застосуванні ортогональних або ротатабельних композиційних планів (ЦКП). Ці плани використовують в якості ядра повний факторний експеримент. На практиці широке застосування отримали два типи ЦКП, відомі як плани Бокса (George Box) та Хартлі (Hartley). Поняття “центральний” означає, що фактори приймають значення, симетричні відносно центра плану.

Центральний композиційний план другого порядку називають планом Бокса, якщо його ядром є ПФЕ  $2^k$ . План Бокса можна зробити ортогональним або ротатабельним. В планах Бокса до ядра, побудованого на основі ПФЕ, додається

одна точка в центрі плану з координатами  $(0,0,\dots,0)$  і  $2k$  “зіркових” точок з координатами  $(\pm\gamma, 0,\dots,0), \dots, (0,0,\dots,\pm\gamma)$ .

Побудований в такий спосіб план буде ЦКП другого порядку. Загальна кількість точок плану при використанні композиційного планування складатиме  $N = N_0 + 2k + 1$ , де  $N_0$  — кількість точок ядра плану.

Побудова ротатабельного плану другого порядку більш складна, ніж ортогонального, а сама задача побудови не має однозначного рішення. Один з підходів до побудови таких планів полягає в наступному. Шляхом спеціального підбору зіркового плеча  $\gamma$  ЦКП Бокса можна зробити ротатабельним.

Точки ротатабельного ЦКП Бокса другого порядку розміщують на концентричних гіперсферах, кількість яких не менше двох. Перша гіперсфера може бути виродженою, тобто являти собою центральну точку плану, її радіус  $\rho_1 = 0$ . Саме така сфера часто застосовується на практиці. Друга гіперсфера відповідає вписаному в неї кубу, вибраному в якості ядра плану. Радіус даної гіперсфери  $\rho_2 = (k)^{1/2}$ . Третя гіперсфера має радіус  $\rho_3 = 2^{k/4}$  [13, 14].

Для того, щоб застосувати метод планування експерименту до формули Вільсона, необхідно побудувати матрицю ротатабельного ЦКП Бокса другого порядку для трьох факторів. Ядром плану є ПФЕ вигляду  $2^3$  (радіус відповідної гіперсфери  $\rho_2 = 3^{1/2} = 1.732$ ). Зіркові точки розміщуються на гіперсфері радіусом  $\rho_3 = 2^{3/4} = 1.682$  та мають координати  $(1.682; 0; 0)$ ,  $(0; 1.682; 0)$ ,  $(0; 0; 1.682)$ . План містить 15 точок та є ненасиченим — кількість шуканих коефіцієнтів рівна 10.

## 2.3 Порівняння теорії нормальних хвиль з променевою теорією

Розповсюдження звуку можна математично описати у вигляді розв’язання хвильового рівняння з урахуванням граничних умов та особливостей середовища в окремому випадку. Існує два теоретичних підходи до розв’язання хвильового рівняння. Перший з них базується на теорії нормальних хвиль або хвильовій теорії, згідно з якою для опису розповсюдження звуку використовуються характеристичні

функції, які називаються нормальними хвилями або модами, кожна з яких є розв'язком хвильового рівняння. Другим підходом є променева теорія, в основі якої лежить постулат про фронти хвиль, на яких фази мають постійні значення, та уявлення про обмежувальні промені для області розповсюдження акустичних коливань [2, 3].

Порівняємо ці дві теорії. Теорія нормальних хвиль має наступні порівняльні особливості:

- формально дає повний розв'язок;
- розв'язок складно інтерпретувати;
- складно отримати розв'язок з врахуванням реальних граничних умов;
- легко задається функція джерела звуку;
- потрібна програма розрахунку на ЕОМ, за винятком деяких випадків, коли існує аналітичний розв'язок.

Порівняльні особливості для променевої теорії:

- траєкторію звукового променя легко подувати;
- досить легко задаються реальні граничні умови, в тому числі похиле дно;
- не залежить від характеру джерела звуку;
- траєкторії звукових променів можна відобразити вручну, використовуючи закон Снеліуса, проте зазвичай використовується програма розрахунку траєкторій променів на ЕОМ [2].

Для створення геометричної моделі розповсюдження звуку в водному середовищі буде розроблена програма розрахунку траєкторій променів.

## 2.4 Висновки

1. Швидкість звуку є головним фактором для побудови геометричної моделі розповсюдження звуку в водному середовищі. Зміна швидкості звуку є причиною викривлення звукових променів.

3. На основі променевої теорії буде розроблюватись програма розрахунку траєкторій променів, за допомогою якої створюватиметься геометрична модель.

### 3. ОБЧИСЛЮВАЛЬНІ МЕТОДИ ПРОГРАМНОЇ СИСТЕМИ

В даному розділі описуються розрахунки та методи обчислення необхідні для вирішення поставлених задач. Особлива увага приділяється виведенню рівняння кола, дугою якого є частина траєкторії звукового променя.

#### 3.1 Розрахунки, необхідні для перевірки методу спрощення формули Вільсона

Формула Вільсона має вигляд (3.1) – (3.6):

$$c(S, T, P) = c_0 + \Delta c_T + \Delta c_S + \Delta c_P + \Delta c_{STP}, \quad (3.1)$$

$$c_0 = 1449.14, \quad (3.2)$$

$$\Delta c_T = 4.5721T - 4.4532T \cdot 10^{-2}T^2 - 2.6045 \cdot 10^{-4}T^3 + 7.9851 \cdot 10^{-6}T^4, \quad (3.3)$$

$$\Delta c_S = 1.39799(S - 35) + 1.69202 \cdot 10^{-3}(S - 35)^2, \quad (3.4)$$

$$\Delta c_P = 1.63432P + 1.06768 \cdot 10^{-3}P^2 + 3.73403 \cdot 10^{-6}P^3 - 3.6332 \cdot 10^{-8}P^4, \quad (3.5)$$

$$\begin{aligned} \Delta c_{STP} = & (S - 35)(-1.1244 \cdot 10^{-2}T + 7.7711 \cdot 10^{-7}T^2 + 7.85344 \cdot 10^{-4}P - \\ & - 1.3458 \cdot 10^{-5}P^2 + 3.2203 \cdot 10^{-7}PT + 1.6101 \cdot 10^{-8}T^2P) + \\ & + P(-1.8974 \cdot 10^{-3}T + 7.6287 \cdot 10^{-5}T^2 + 4.6176 \cdot 10^{-7}T^3) + \\ & + P^2(-2.6301 \cdot 10^{-5}T + 1.9302 \cdot 10^{-7}T^2) + P^3(-2.0831 \cdot 10^{-7}T) \end{aligned} \quad (3.6)$$

де  $c(S, T, P)$  — швидкість звуку, м/с;

$T$  — температура, °C;

$S$  — солоність, ‰;

$P$  — гідростатичний тиск, МПа.

Формула Вільсона справедлива для наступних діапазонів температури, солоності та гідростатичного тиску:

- температура  $-4^{\circ}\text{C}$  до  $30^{\circ}\text{C}$ ;
- солоність від  $0\text{‰}$  до  $37\text{‰}$ ;
- гідростатичний тиск від  $0.1\text{ МПа}$  до  $100\text{ МПа}$  [5].

Відомо, що застосувавши до даної формули методи теорії планування експерименту, можна побудувати матрицю ротатбельного центрального композиційного плану Бокса другого порядку для трьох факторів [13, 14]. За допомогою методу найменших квадратів [16, 17], на основі побудованої матриці, знаходимо вектор коефіцієнтів  $B=[b_0, b_1, \dots, b_9]$  для спрощеної формули, яка має вигляд полінома 2-го степеня (3.7):

$$c(S, T, P) = b_0 + b_1T + b_2S + b_3P + b_4TS + b_5TP + b_6SP + b_7T^2 + b_8S^2 + b_9P^2. \quad (3.7)$$

Вхідна таблиця даних містить виміряні значення температури, солоності та густини. Для перевірки методу спрощення формули Вільсона потрібно обчислити значення гідростатичного тиску. Для цього скористаємось формулою (3.8) [18]:

$$P = \rho * g * H, \quad (3.8)$$

де  $P$  — гідростатичний тиск, Па;

$\rho$  — густина води,  $\text{кг/м}^3$ ;

$g = 9.81\text{ м/с}^2$  — прискорення вільного падіння;

$H$  — глибина, м.

Значення гідростатичного тиску одержані за формулою (3.8), підставляємо у формулу Вільсона (3.5) – (3.6) та спрощену емпіричну формулу (3.7). Тепер досить легко знайти максимальні відхилення обчислених значень швидкості звуку від виміряних.



### 3.2 Розрахунок градієнтів зміни швидкості звуку за глибиною занурення

Для виділених на профілі швидкості звуку водних шарів з лінійною залежністю швидкості звуку від глибини необхідно обчислити значення градієнтів зміни швидкості звуку за глибиною занурення. Для цього скористаємось формулою (3.9):

$$k = \frac{dc}{dh}, \quad (3.9)$$

де  $k$  — градієнт зміни швидкості звуку за глибиною,  $\text{с}^{-1}$ ;

$dc$  — приріст швидкості звуку, який спостерігається для водного шару;

$dh$  — приріст глибини занурення.

Підставляючи у формулу (3.9) різниці значень глибини та швидкості звуку на межах виділених водних шарів, одержуємо значення градієнтів зміни швидкості звуку за глибиною занурення для кожної з виділених ділянок на профілі швидкості звуку.

### 3.3 Виведення формул залежності траєкторії звукового променя від початкових значень

Розглянемо випадок, коли швидкість звуку за глибиною змінюється лінійно, градієнт зміни швидкості звуку за глибиною занурення  $k = \text{const}$ . Для відображення заломлення акустичних променів, скористаємось законом Снеліуса [2, 19], який для переходу звукового променя з одного водного шару зі сталою швидкістю звуку в інший, має вигляд (3.10):

$$\frac{\sin \theta_1}{c_1} = \frac{\sin \theta_2}{c_2}, \quad (3.10)$$

де  $c_1, c_2$  — швидкості звуку для початкового та кінцевого водних шарів;  
 $\theta_1, \theta_2$  — початкові кути швидкості звуку  $c_1$  та  $c_2$  відповідно.

Наглядно це можна побачити на рисунку 3.1.

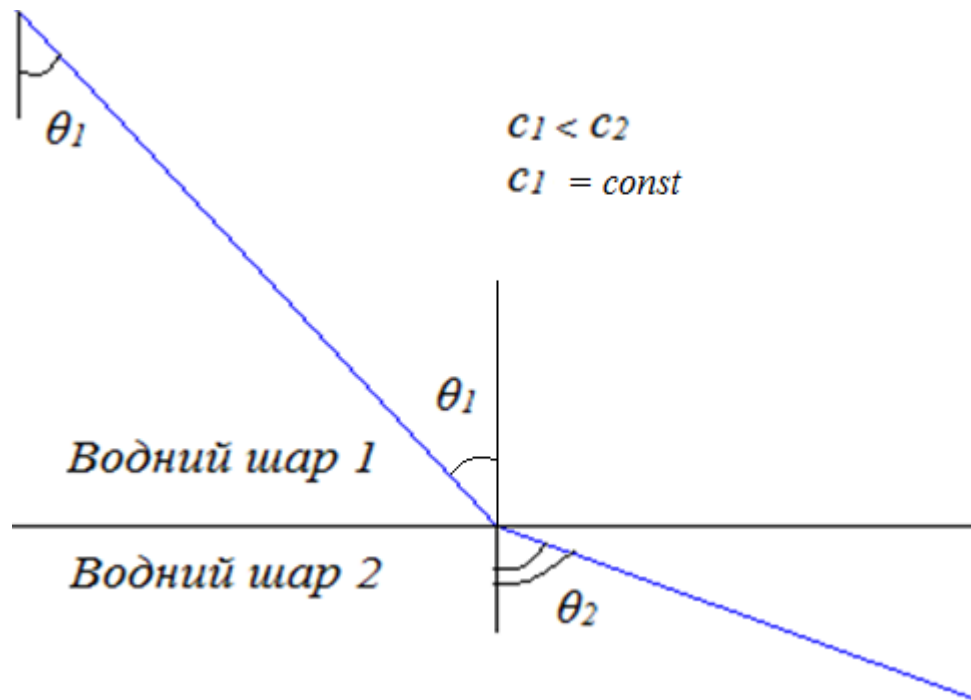


Рисунок 3.1 — Перехід звукового променя з одного водного шару в інший

Спираючись на закон Снеліуса, виведемо формулу залежності траєкторії звукового променя від початкових значень швидкості звуку та кута випромінювання.

На рисунку 3.2 зображено початок траєкторії звукового променя з кутом випромінювання  $\theta_0$ .

Згідно із законом Снеліуса, маємо рівність  $\frac{\sin \theta}{c(x)} = \frac{\sin \theta_0}{c_0} = A$ , де  $A = \text{const.}$ .

Відповідно,  $\sin \theta = A \cdot c(x)$ ;  $\sin^2 \theta = A^2 c^2(x)$ ;  $\cos^2 \theta = 1 - A^2 c^2(x)$ . За геометричним змістом похідної [20]  $\text{tg} \theta = y'(x)$ . Звідси випливає, що

$(y')^2 = \frac{1}{\cos^2 \theta} - 1 = \frac{1}{1 - A^2 c^2(x)} - 1 = \frac{A^2 c^2(x)}{1 - A^2 c^2(x)}$ . Отримали диференціальне рівняння

$y' = \pm \frac{A \cdot c(x)}{\sqrt{1 - A^2 c^2(x)}}$ ,  $y(0) = 0, c(0) = c_0$ . Перед тим, як його розв'язати, спочатку знайдемо

максимальну глибину, якої досягає звуковий промінь. Швидкість звуку змінюється

за формулою  $c = c(h) = c(x) = c_0 + k \cdot h = c_0 + k \cdot x$ . Із закону Снеліуса маємо

$c(x_0) = \frac{1}{A} = \frac{c_0}{\sin \theta_0}$ . Отже,  $c_0 + k \cdot x_0 = \frac{c_0}{\sin \theta_0}$ . Для знаходження максимальної глибини

отримали формулу  $x_0 = \frac{c_0(1 - \sin \theta_0)}{k \cdot \sin \theta_0} = h_{\max}$ .

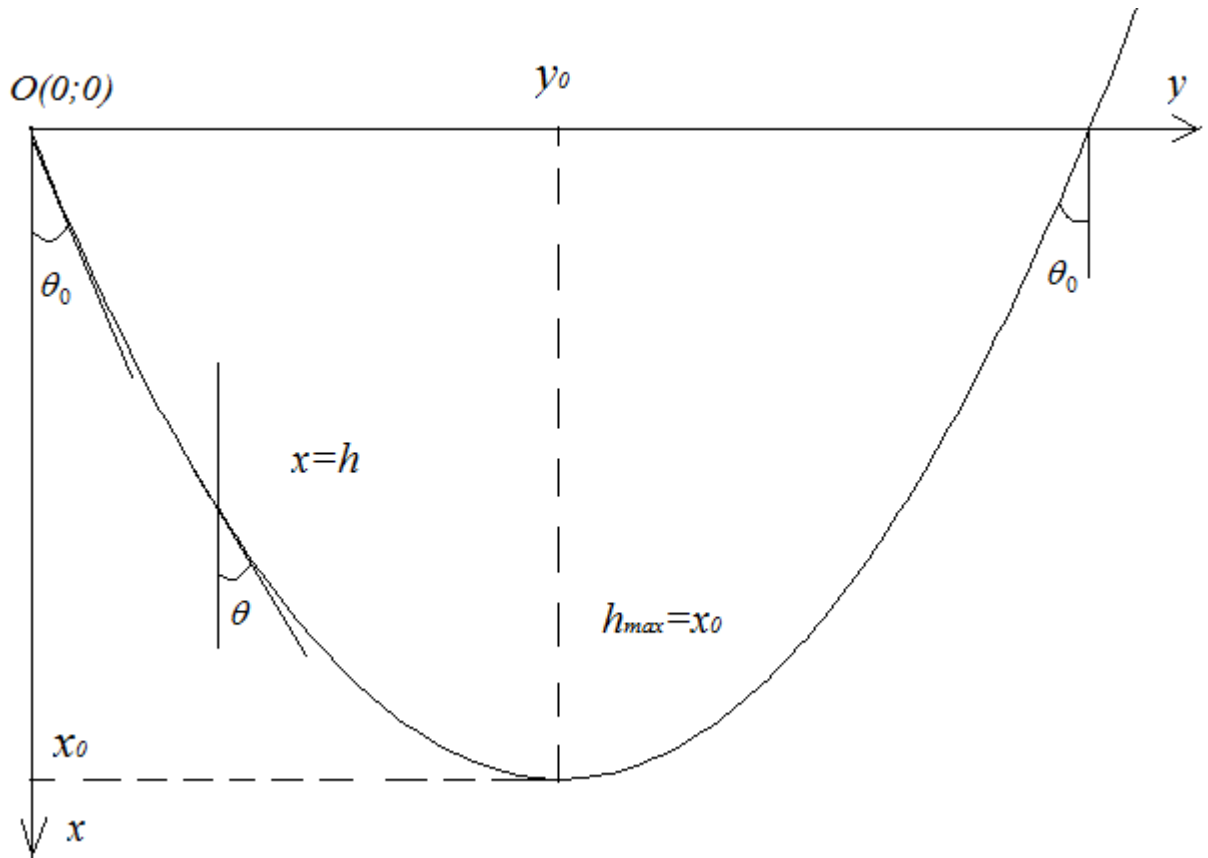


Рисунок 3.2 — Початок траєкторії звукового променя з кутом випромінювання  $\theta_0$

Розглянемо два випадки. Випадок 1.

$y' = \frac{A \cdot c(x)}{\sqrt{1 - A^2 c^2(x)}}$ ,  $y(0) = 0$ ,  $h_0 \leq x \leq x_0 = \frac{c_0(1 - \sin \theta_0)}{k \cdot \sin \theta_0}$ ,  $0 \leq y \leq y_0$ . Знайдемо розв'язок

даного диференціального рівняння:  $y = A \int \frac{c(x)}{\sqrt{1 - A^2 c^2(x)}} dx =$

$\begin{aligned} c(x) &= c_0 + k \cdot x \\ t &= 1 - A^2 c^2(x) \\ dt &= -A^2 \cdot 2c(x) \cdot c'(x) dx = \\ &= -2A^2 k \cdot c(x) dx = \\ &= -2Ak(A \cdot c(x) dx) \\ A \cdot c(x) dx &= -\frac{dt}{2Ak} \end{aligned}$	=
---	---

$$= -\frac{1}{2Ak} \int \frac{dt}{\sqrt{t}} = -\frac{2}{2Ak} \sqrt{t} + C^* = -\frac{1}{Ak} \sqrt{1 - A^2 c^2(x)} + C^*; \quad -\frac{1}{Ak} \sqrt{1 - A^2 c_0^2} + C^* = 0;$$

$$C^* = \frac{1}{Ak} \sqrt{1 - A^2 c_0^2} = \frac{c_0}{k \cdot \sin \theta} \sqrt{1 - \sin^2 \theta} = \frac{c_0 \operatorname{ctg} \theta}{k}.$$

Залежність між відстанню, яку пройшов звуковий промінь та глибиною, для випадку, коли значення глибини змінюються починаючи від початкового до максимального, виражається за формулою (3.11):

$$y(x) = -\frac{c_0}{k \cdot \sin \theta_0} \sqrt{1 - \frac{\sin^2 \theta_0}{c_0^2} (c_0 + k \cdot x)^2} + \frac{c_0 \operatorname{ctg} \theta_0}{k}, \quad (3.11)$$

де  $y(x)$  — відстань, яку пройшов звуковий промінь, м;

$x$  — глибина, якої досяг звуковий промінь, м;

$c_0$  — початкова швидкість звуку, м/с;

$k$  — градієнт зміни швидкості звуку за глибиною,  $\text{с}^{-1}$ ;

$\theta_0$  — початковий кут випромінювання, рад.

Випадок 2.  $y' = -\frac{A \cdot c(x)}{\sqrt{1 - A^2 c^2(x)}}$ ,  $y \geq y_0$ . За аналогією до випадку 1, знаходимо

розв'язок даного диференціального рівняння:  $y(x) = \frac{1}{Ak} \sqrt{1 - A^2 c^2(x)} + C^{**}$ . Враховуючи

початкові умови  $y(x_0) = y_0$ ,  $y_0 = \frac{c_0 \operatorname{ctg} \theta_0}{k}$ ,  $c(x_0) = \frac{c_0}{\sin \theta_0}$ , одержуємо

$$\frac{1}{Ak} \sqrt{1 - \frac{\sin^2 \theta_0}{c_0^2} \cdot \frac{c_0^2}{\sin^2 \theta_0}} + C^{**} = \frac{c_0 \operatorname{ctg} \theta_0}{k}; \quad C^{**} = \frac{c_0 \operatorname{ctg} \theta_0}{k}.$$

Залежність між відстанню, яку пройшов звуковий промінь та глибиною, для випадку, коли значення глибини змінюються починаючи від максимального, виражається за формулою (3.12):

$$y(x) = \frac{c_0}{k \cdot \sin \theta_0} \sqrt{1 - \frac{\sin^2 \theta_0}{c_0^2} (c_0 + k \cdot x)^2} + \frac{c_0 \operatorname{ctg} \theta_0}{k}. \quad (3.12)$$

Відстань, яку пройшов звуковий промінь від початкового значення глибини до максимального, знаходимо за формулою  $y_{\max} = y_0 = \frac{c_0 \operatorname{ctg} \theta_0}{k}$ .

Покажемо, що траєкторією звукового променя є дуга кола. Зробимо наступні

перетворення формул (3.11) – (3.12):  $(y - \frac{c_0 \operatorname{ctg} \theta_0}{k})^2 = \frac{c_0^2}{k^2 \sin^2 \theta_0} (1 - \frac{\sin^2 \theta_0}{c_0^2} (c_0 + k \cdot x)^2)$ ;

$$(y - \frac{c_0 \operatorname{ctg} \theta_0}{k})^2 = \frac{c_0^2}{k^2 \sin^2 \theta_0} - \frac{(c_0 + k \cdot x)^2}{k^2}; (y - \frac{c_0 \operatorname{ctg} \theta_0}{k})^2 + \frac{(c_0 + k \cdot x)^2}{k^2} = \frac{c_0^2}{k^2 \sin^2 \theta_0};$$

$$\frac{(c_0 + k \cdot x)^2}{(\frac{c_0}{\sin \theta_0})^2} + \frac{(y - \frac{c_0 \operatorname{ctg} \theta_0}{k})^2}{(\frac{c_0}{k \cdot \sin \theta_0})^2} = 1. \text{ В результаті отримаємо рівняння кола (3.13):}$$

$$\frac{(x + \frac{c_0}{k})^2}{(\frac{c_0}{k \cdot \sin \theta_0})^2} + \frac{(y - \frac{c_0 \operatorname{ctg} \theta_0}{k})^2}{(\frac{c_0}{k \cdot \sin \theta_0})^2} = 1. \quad (3.13)$$

З рівняння (3.13) випливає, що частина траєкторії звукового променя, зображена на рисунку 3.2 є дугою кола з радіусом  $R$ , що знаходиться за формулою (3.14):

$$R = \frac{c_0}{k \cdot \sin \theta_0}, \quad (3.14)$$

де  $R$  — радіус кола, м;

$c_0$  — початкова швидкість звуку, м/с;

$k$  — градієнт зміни швидкості звуку за глибиною,  $\text{с}^{-1}$ ;

$\theta_0$  — початковий кут випромінювання, рад.

Центр кола знаходиться в точці  $O'(-\frac{c_0}{k}; \frac{c_0 \operatorname{ctg} \theta_0}{k})$ .

Таким чином, ми встановили залежність між траєкторією звукового променя та початковими значеннями швидкості звуку та кута падіння, для водного шару з лінійною зміною швидкості звуку.

Оскільки траєкторією звукового променя є дуга кола, то для її побудови ми можемо підставити формулу радіуса (3.14) та координати центра кола в параметричне рівняння [21]:  $x = x' + R \cdot \cos(\varphi)$ ;  $y = y' + R \cdot \sin(\varphi)$ , де  $x, y$  — координати

точки на колі;  $R$  – радіус кола;  $x', y'$  – координати центра кола;  $\varphi$  – кут повороту радіуса проти годинникової стрілки, починаючи від горизонтального положення.

### 3.4 Використання виведених формул для побудови траєкторії звукового променя

Застосуємо виведені формули залежності траєкторії звукового променя від початкових значень швидкості звуку та кута випромінювання до виділених водних шарів.

Для кожного водного шару ми маємо сталі значення градієнту швидкості звуку за глибиною, яке знаходиться за допомогою формули (3.9). Оскільки при виведенні формул (3.11) – (3.14) вісь глибини була направлена вниз (рисунок 3.2), то змінивши напрям даної осі на протилежний рівняння кола, дугою якого є траєкторія звукового променя, набуде вигляду (3.15):

$$\frac{(x - \frac{c_0}{k})^2}{(\frac{c_0}{k \cdot \sin \theta_0})^2} + \frac{(y - \frac{c_0 \operatorname{ctg} \theta_0}{k})^2}{(\frac{c_0}{k \cdot \sin \theta_0})^2} = 1, \quad (3.15)$$

де  $y$  — відстань, яку пройшов звуковий промінь, м;

$x$  — глибина, якої досяг звуковий промінь, м;

$c_0$  — початкова швидкість звуку, м/с;

$k$  — градієнт зміни швидкості звуку за глибиною, с<sup>-1</sup>;

$\theta_0$  — початковий кут випромінювання, рад.

Оскільки ми враховуємо знак градієнта зміни швидкості звуку за глибиною, то в формулі радіуса кола беремо абсолютне значення градієнта. Формула для знаходження радіуса кола набуває вигляду (3.16):

$$R = \frac{c_0}{|k| \cdot \sin \theta_0}, \quad (3.16)$$

де  $R$  — радіус кола, м;

$c_0$  — початкова швидкість звуку, м/с;

$k$  — градієнт зміни швидкості звуку за глибиною,  $\text{с}^{-1}$ ;

$\theta_0$  — початковий кут випромінювання, рад.

Центр кола (3.15) знаходиться в точці  $O'(\frac{c_0}{k}; \frac{c_0 \text{ctg} \theta_0}{k})$ .

Дивлячись на те, що в нас початкова точка відліку координат має нульові значення глибини та відстані, яку пройшов звуковий промінь, і вісь для глибини направлена вгору, значення глибини у формулі, яка описує лінійну залежність швидкості звуку від глибини,  $c(h) = c_0 + k \cdot h$  стають від'ємними. В такому разі, щоб швидкість звуку зростала, потрібно брати градієнт зміни швидкості звуку за глибиною зі знаком мінус. Виходячи з цього, ми будемо брати величину градієнта зміни швидкості звуку за глибиною занурення від'ємною для тих водних шарів, де прослідковується зростання швидкості звуку. Для водних шарів, де швидкість звуку зменшується, дану величину братимемо додатною.

Для побудови траєкторії звукового променя використовуватимемо замість формул (3.13) – (3.14) формули (3.15) та (3.16). Щоб відобразити рефракцію звукових променів, скористаємось законом Снеліуса (3.10).

### 3.5 Алгоритми роботи програми

Наведемо алгоритми роботи програми у вигляді блок-схем. Блок-схема алгоритму для перевірки методу спрощення формули Вільсона до вигляду полінома 2-го степеня зображена на рисунку 3.3.

Спочатку зчитуються виміряні значення швидкості звуку, температури, солоності, густини морської води, а також глибини занурення. За допомогою формули (3.8) проводиться розрахунок гідростатичного тиску. Значення температури, солоності, та гідростатичного тиску підставляються у формулу

Вільсона (3.1) – (3.6), за допомогою якої обчислюються значення швидкості звуку. Наступною йде побудова полінома 2-го степеня для області дослідження.

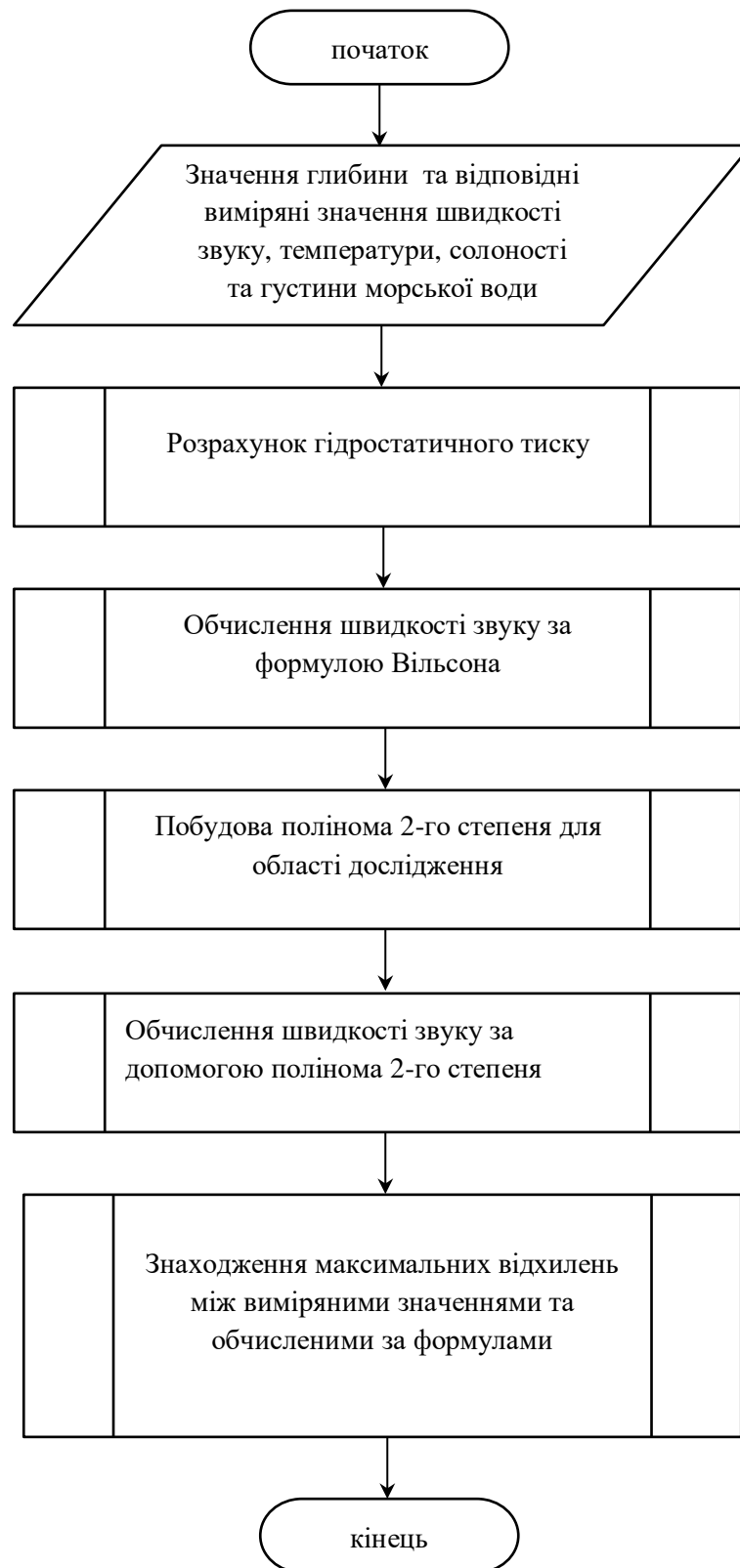


Рисунок 3.3 – Блок-схема алгоритму програми для перевірки методу спрощення формули Вільсона



За допомогою побудованого полінома 2-го степеня обчислюємо швидкість звуку так само, як це робили для формули Вільсона. Знаходимо максимальні відхилення між виміряними значеннями та обчисленими за формулами Вільсона та спрощеною формулою.

Блок-схема алгоритму програми для побудови траєкторії звукового променя зображена на рисунку 3.4.

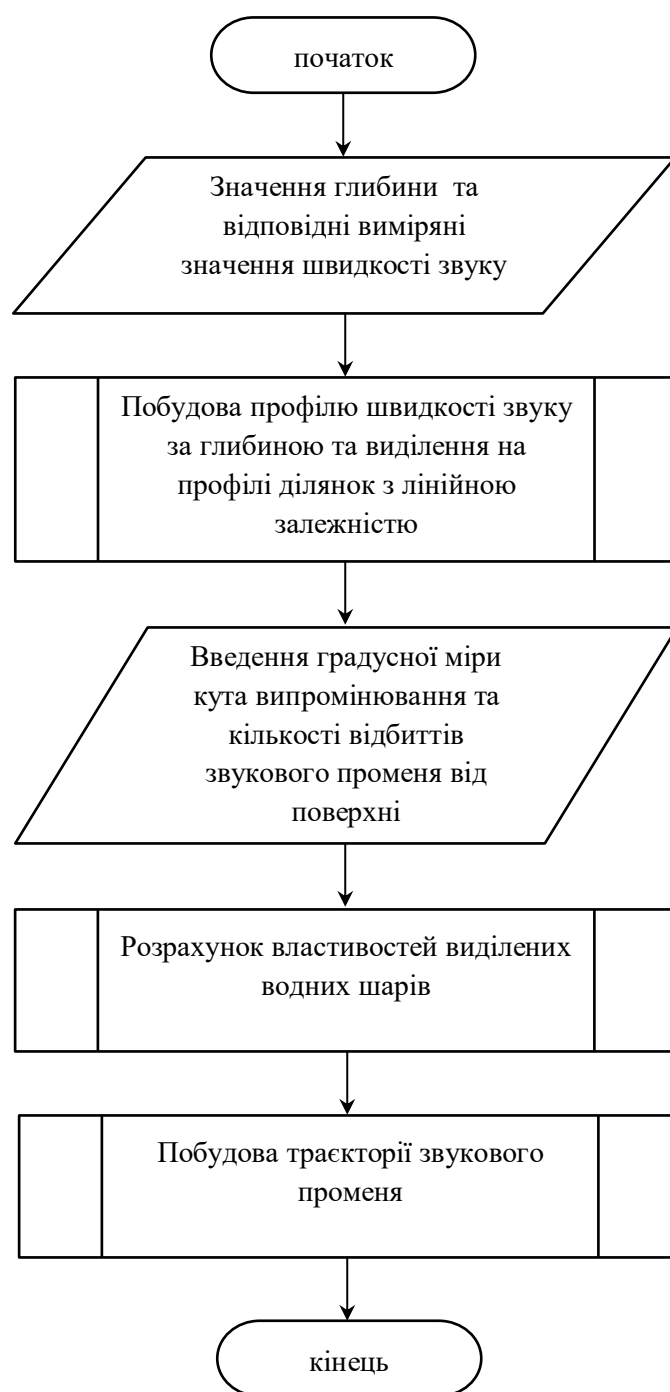


Рисунок 3.4 – Блок-схема алгоритму програми для побудови траєкторії променя

Спочатку програма зчитує значення глибини та відповідні виміряні значення швидкості звуку. На основі цих даних будується профіль швидкості звуку, на якому виділяються ділянки з лінійною залежністю швидкості звуку від глибини занурення. Для кожного з виділених таким способом водних шарів, попередньо задавши значення кута випромінювання та кількості відбиттів звукового променя від поверхні, проводимо обчислення значень їхніх властивостей: початкової швидкості звуку, кінцевої глибини, початкового кута, під яким траєкторія входить у водний шар та градієнта зміни швидкості звуку за глибиною. Значення властивостей водних шарів використовуються безпосередньо для побудови траєкторії, а саме для розрахунку радіусів та центрів кіл, сполученням дуг яких є траєкторія звукового променя.

### **3.6 Висновки**

1. Розглянуто методи обчислення, необхідні для вирішення поставлених задач.
2. На основі математичного аналізу виведено формули залежності траєкторії звукового променя від початкових значень швидкості звуку та кута випромінювання.
3. Виведено загальний вигляд рівняння кола, дугою якого є частина траєкторії звукового променя, що проходить крізь водний шар з лінійною залежністю швидкості звуку від глибини.
4. Набуло подальшого розвитку застосування методу побудови траєкторії звукового променя для стратифікованого за швидкістю звуку водного середовища, за рахунок застосування даного методу до реальних даних, одержаних в результаті проведення експерименту з вимірювання швидкості звуку.

## 4. ОПИС ПРОГРАМНОЇ РЕАЛІЗАЦІЇ

В даному розділі робиться огляд архітектури системи, засобів програмної реалізації та інтерфейсу програми. Описується програмна реалізація вирішення поставлених задач.

### 4.1 Архітектура системи

Програма реалізована засобами програмного пакету MATLAB [22 – 24] версії R2014a. Головною властивістю даної версії є підтримування у функціях статичних змінних, що дозволяє використовувати змінні за межами блоків коду, в яких вони були створені. Для реалізації були використані засоби розробки програм з графічним інтерфейсом [25]. Вхідними даними до програми є таблиця вимірних значень, одержаних в результаті експерименту з вимірювання швидкості звуку. Дана таблиця зберігається в текстовому файлі exp.txt.

Інтерфейс програми складається з трьох графічних вікон. Перше вікно має назву experiment.fig і для запуску та роботи з ним використовується m-файл experiment.m. Наступне графічне вікно, яке має назву GMSound.fig, можна викликати з вікна experiment.fig. Для запуску і роботи з ним використовується файл GMSound.m. М-файли для даних графічних вікон містять в собі функції для зчитування інформації з текстового файлу exp.txt, в якому зберігаються результати експерименту з вимірювання швидкості звуку. Третє графічне вікно має назву pwnd.fig і є допоміжним. Головним його призначенням є відображення побудованої траєкторії, з можливістю збільшення та зменшення масштабної сітки.

Взаємодію між файлами в програмі схематично зображено на рисунку 4.1. Спочатку програма за допомогою файлів experiment.m та GMSound.m зчитує виміряні значення з текстового файлу exp.txt. З файлу experiment.m, в якому відбувається перевірка, за допомогою зчитаних даних, методу спрощення формули Вільсона, можна викликати файл GMSound.m, за допомогою якого відбувається

побудова траєкторії звукового променя. З файлу GMSound.m викликається файл nwnd.m, який використовується для відображення побудованої траєкторії звукового променя.

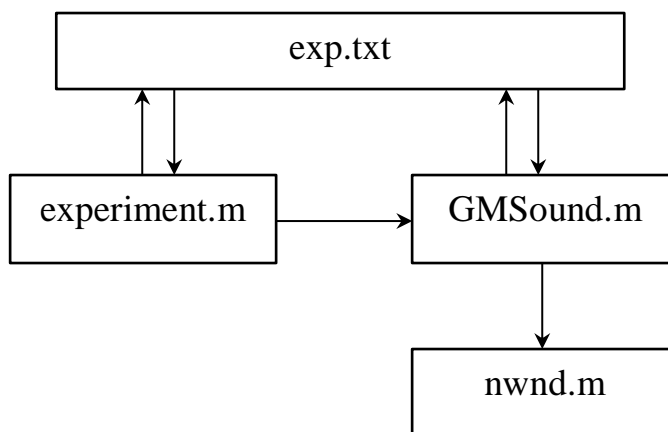


Рисунок 4.1 — Схема взаємодії між файлами програми

## 4.2 Інтерфейс програми для перевірки методу спрощення формули Вільсона

Графічне вікно, призначене для перевірки методу спрощення формули Вільсона за допомогою вимірних значень, зображене на рисунку 4.2.

Вхідні дані відображаються в таблиці на панелі з назвою “Таблиця значень” після того, як користувач натисне кнопку “Побудувати таблицю”. Разом з вимірними значеннями будуть відображені обчислені значення гідростатичного тиску, швидкості звуку за формулою Вільсона, швидкості звуку за допомогою спрощеної емпіричної формули, вектори відхилення між вимірними значеннями та обчисленими за формулами. Також під таблицею будуть виведені максимальні відхилення. Результат, який отримає користувач після натиснення кнопки “Побудувати таблицю” зображено на рисунку 4.3. Перша колонка побудованої таблиці містить вимірні значення швидкості звуку, 8-ма колонка – значення швидкості звуку обчислені за формулою Вільсона, 10-та – значення швидкості звуку обчислені за допомогою спрощеної емпіричної формули, яка має вигляд полінома 2-

го степеня, 9-та і 11-та колонки є векторами відхилень відповідно для формули Вільсона та спрощеної формули.

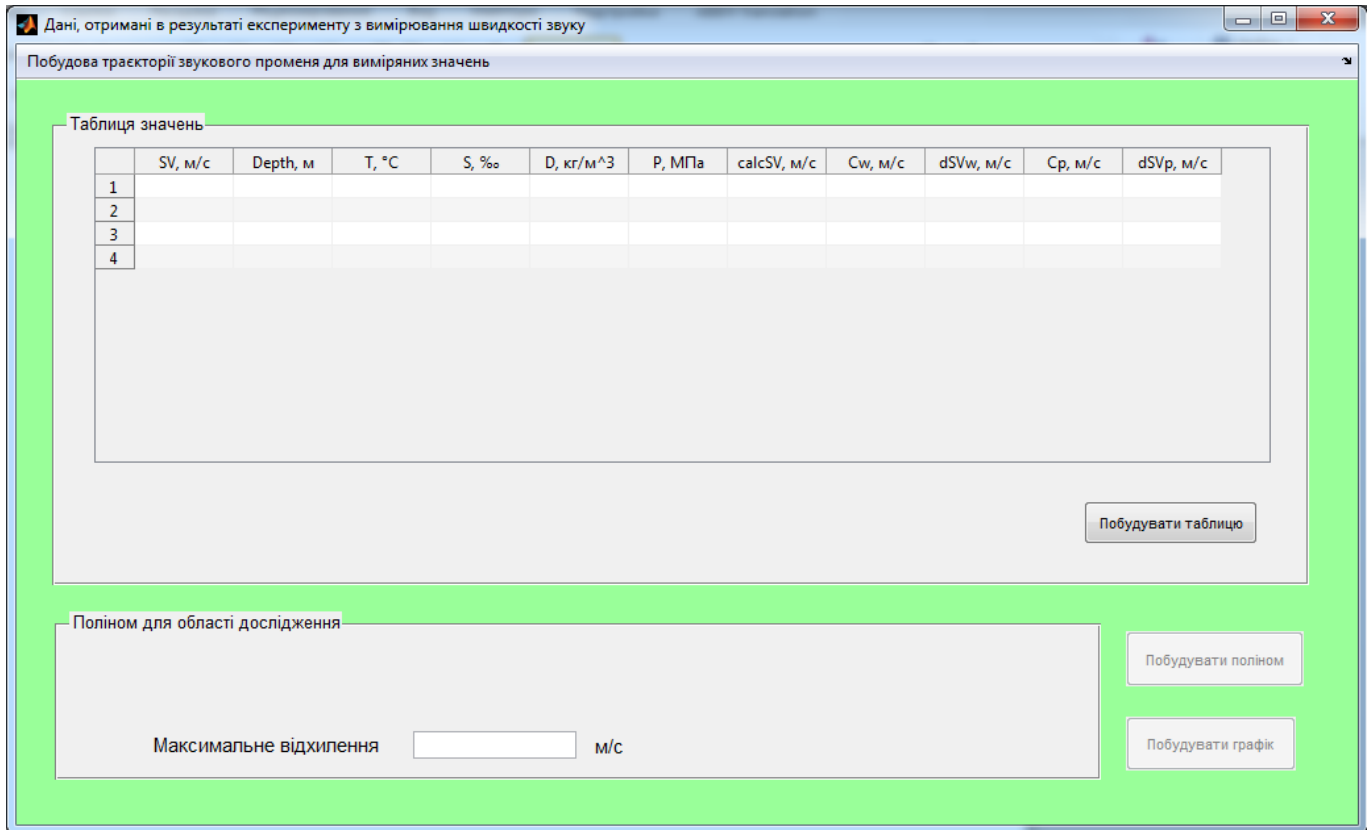


Рисунок 4.2 – Графічне вікно для перевірки методу спрощення формули Вільсона

Таблиця значень

	SV, м/с	Depth, м	T, °C	S, ‰	D, кг/м³	P, МПа	calcSV, м/с	Cw, м/с	dSVw, м/с	Cp, м/с	dSVp, м/с
1	1537.4	0.40000	30.844	25.398	1014.3	0.0039800	1537.4	1537.4	0.014852	1537.5	0.072777
2	1544.4	1.2700	30.377	33.052	1020.1	0.012710	1544.4	1544.4	0.014038	1544.5	0.07909
3	1544.4	1.1500	30.378	33.043	1020.1	0.011509	1544.4	1544.4	0.013654	1544.5	0.07869
4	1544.4	1.0400	30.380	33.031	1020.1	0.010408	1544.4	1544.4	0.013348	1544.4	0.07837
5	1544.4	0.93000	30.381	33.029	1020.1	0.0093069	1544.4	1544.4	0.014484	1544.4	0.07948
6	1544.4	0.82000	30.380	33.032	1020.1	0.0082061	1544.4	1544.4	0.013747	1544.4	0.07874
7	1544.4	0.71000	30.378	33.034	1020.1	0.0071053	1544.4	1544.4	0.012897	1544.4	0.07790
8	1544.4	0.82000	30.374	33.029	1020.1	0.0082061	1544.4	1544.4	0.013218	1544.4	0.07827
9	1544.4	0.94000	30.375	33.030	1020.1	0.0094070	1544.4	1544.4	0.012323	1544.4	0.07737
10	1544.4	1.0800	30.375	33.029	1020.1	0.010808	1544.4	1544.4	0.012596	1544.4	0.07766
11	1544.4	1.2100	30.376	33.037	1020.1	0.012109	1544.4	1544.4	0.014221	1544.4	0.07929

Максимальне відхилення між виміряними значеннями та формулою Вільсона =0.37627 м/с

Максимальне відхилення між виміряними значеннями та поліномом =0.32665 м/с

Побудувати таблицю

Рисунок 4.3 – Таблиця з вимірними та обчисленими значеннями

З результатів зображених на рисунку 4.3 можна зробити висновок, що формула Вільсона має максимальну похибку 0.376 м/с порівняно з вимірними

даними. Якщо до формули Вільсона на області вимірних значень застосувати методи теорії планування експерименту, то одержана спрощена емпірична формула, яка матиме вигляд полінома 2-го степеня, буде мати меншу максимальну похибку, яка дорівнюватиме 0.327 м/с. Це можна пояснити тим, що спрощена формула має значно меншу область визначення, ніж формула Вільсона. На рисунку 4.4, де зображений побудований поліном, можна побачити, що область значень температури, солоності та гідростатичного тиску, для якої проводились дослідження є наступною:

- температура 20.83 °C до 30.844 °C;
- солоність від 25.398 ‰ до 34.56 ‰;
- гідростатичний тиск від 0.0029 МПа до 0.882 МПа.

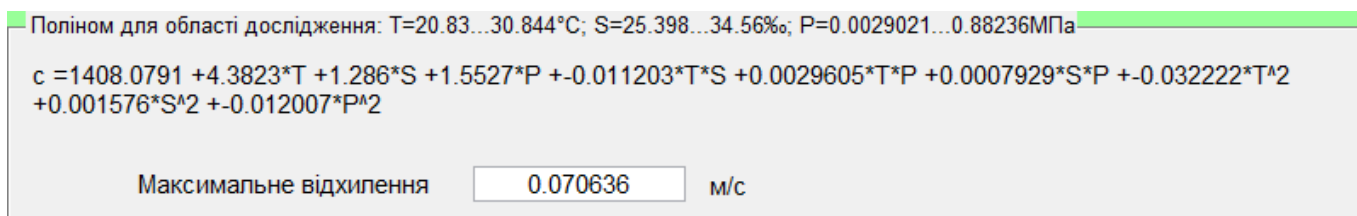


Рисунок 4.4 – Спрощена емпірична формула для області вимірних значень

Щоб отримати результат, зображений на рисунку 4.4, користувачу потрібно натиснути кнопку “Побудувати поліном”. Максимальне відхилення між значеннями обчисленими за допомогою побудованого полінома 2-го степеня та формулою Вільсона становить приблизно 0.071 м/с.

Для відображення значень таблиці на графіку, користувачу програми достатньо натиснути на кнопку “Побудувати графік”. В результаті відкриється нове графічне вікно з побудованим графіком (рисунок 4.5), який відображатиме залежність швидкості звуку від температури та глибини. В графічному вікні одночасно будуть побудовані графіки для вимірних значень та обчислених за допомогою формул. Як бачимо, графіки майже співпадають, що наглядно демонструє нам високу точність методу спрощення формули Вільсона.

На рисунках 4.3, 4.4 і 4.5 помітно, що отримані максимальні відхилення є невеликими, що ще раз доводить, що формула Вільсона є досить точною для

розрахунку швидкості звуку в морській воді, та метод спрощення формули Вільсона зберігає точність, характерну для цієї формули.

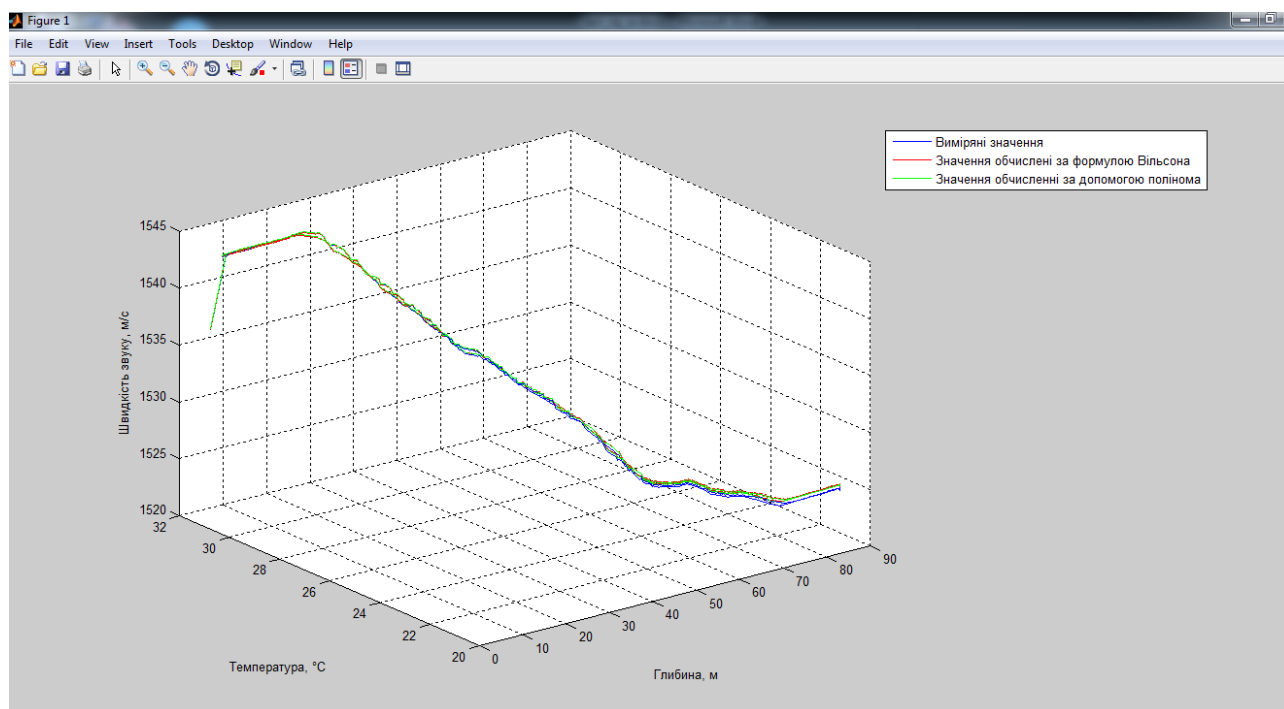


Рисунок 4.5 – Графічне вікно з побудованими графіками швидкості звуку

### 4.3 Інтерфейс програми для побудови траєкторії звукового променя

Графічне вікно для побудови траєкторії звукового променя з урахуванням стратифікації водного середовища за швидкістю звуку, зображене на рисунку 4.6. Для виклику даного вікна, потрібно в графічному вікні, призначеному для перевірки методу спрощення формули Вільсона (рисунок 4.2), натиснути “Побудова траєкторії звукового променя для виміряних значень”.

Для початку роботи з даним графічним вікном, потрібно натиснути кнопку “Побудувати таблицю”. Користувач отримає результат зображений на рисунку 4.7. Таблиця з виміряними значеннями швидкості звуку та відповідними значеннями глибини буде заповненою. Одержана таблиця складається з перших двох рядків таблиці, зображеної на рисунку 4.3. На основі цих даних буде будуватись профіль швидкості звуку за глибиною занурення.

Побудова траєкторії звукового променя для виміряних значень

	C, м/с	H, м
1		
2		
3		
4		

**Межі водних шарів**

Швидкість звуку

c0 = 1544.292 м/с

c1 = 1544.611 м/с

c2 = 1527.949 м/с

c3 = 1524.422 м/с

c4 = 1524.539 м/с

Глибина

h0 = 0.29 м

h1 = 18.75 м

h2 = 50.11 м

h3 = 74.81 м

h4 = 87.83 м

**Параметри для побудови траєкторії**

Градусна міра початкового кута Tet0, °

Tet0 = 85

Кількість відбиттів променя від поверхні

n = 0

Побудувати таблицю водних шарів

	H, м	C, м/с	Tet, °	k, 1/с
1				
2				
3				
4				

Побудувати траєкторію

**Відстань та глибина ГАС**

L = 1000 м H = 60 м

Побудувати таблицю

Побудувати графік

Позначити розміщення ГАС

Рисунок 4.6 – Графічне вікно для побудови траєкторії звукового променя

Для побудови профілю швидкості звуку, користувачу потрібно натиснути кнопку “Побудувати графік”. Після натиснення кнопки з’явиться нове графічне вікно з побудованим профілем швидкості звуку, зображене на рисунку 4.8. На профілі швидкості звуку будуть виділені шари відповідно до меж, заданих на панелі з назвою “Межі водних шарів”. Умовно водне середовище поділено на 4 ділянки, на яких залежність швидкості звуку дуже близька до лінійної. Користувач має можливість змінювати значення швидкості звуку та глибини і в такий спосіб регулювати межі виділених водних шарів.

На профілі швидкості звуку досить легко виділити 4 ділянки із залежністю швидкості звуку, близькою до лінійної, як це показано на рисунку 4.8. Перша ділянка знаходиться від поверхні до глибини 18.75 м, на ній швидкість звуку зростає. Для наступних двох ділянок характерним є зменшення швидкості звуку, їхні кінцеві межі відповідно дорівнюють 50.11 м та 74.81 м. Для останньої ділянки, яка знаходиться, починаючи від глибини 74.81 м до дна моря 87.83 м, швидкість



звуку знову зростає. Межі водних шарів на графіку зображені зеленими пунктирними лініями.

	C, м/с	H, м
1	1537.4	0.40000
2	1544.4	1.2700
3	1544.4	1.1500
4	1544.4	1.0400
5	1544.4	0.93000
6	1544.4	0.82000
7	1544.4	0.71000
8	1544.4	0.82000
9	1544.4	0.94000
10	1544.4	1.0800
11	1544.4	1.2100
12	1544.4	1.3300
13	1544.4	1.4400
14	1544.4	1.5600
15	1544.4	1.6700
16	1544.4	1.8400
17	1544.4	2.0100
18	1544.4	2.1700
19	1544.4	2.3600
20	1544.4	2.4700
21	1544.4	2.5900
22	1544.4	2.7300
23	1544.4	2.8400
24	1544.4	2.9600
25	1544.4	3.0700
26	1544.4	3.1900
27	1544.4	3.3200
28	1544.4	3.4900
29	1544.4	3.6500

Рисунок 4.7 – Таблиця для побудови профілю швидкості звуку

Після виділення водних шарів, користувач може задати градусну міру кута випромінювання, та кількість відбиттів звукового променя від поверхні моря. Ці значення задаються на панелі елементів з назвою “Параметри для побудови траєкторії”, яка зображена на рисунку 4.9. Програма зчитує введену градусну міру кута випромінювання користувачем, переводить зчитане значення в радіани, і за допомогою закону Снеліуса (3.10) відбувається розрахунок початкових кутів, під якими звуковий промінь входить в кожний з водних шарів. В якості початкових значень швидкості звуку приймаються значення задані користувачем на верхніх

межах водних шарів. Також за формулою (3.9) проводиться розрахунок градієнтів зміни швидкості звуку за глибино занурення.

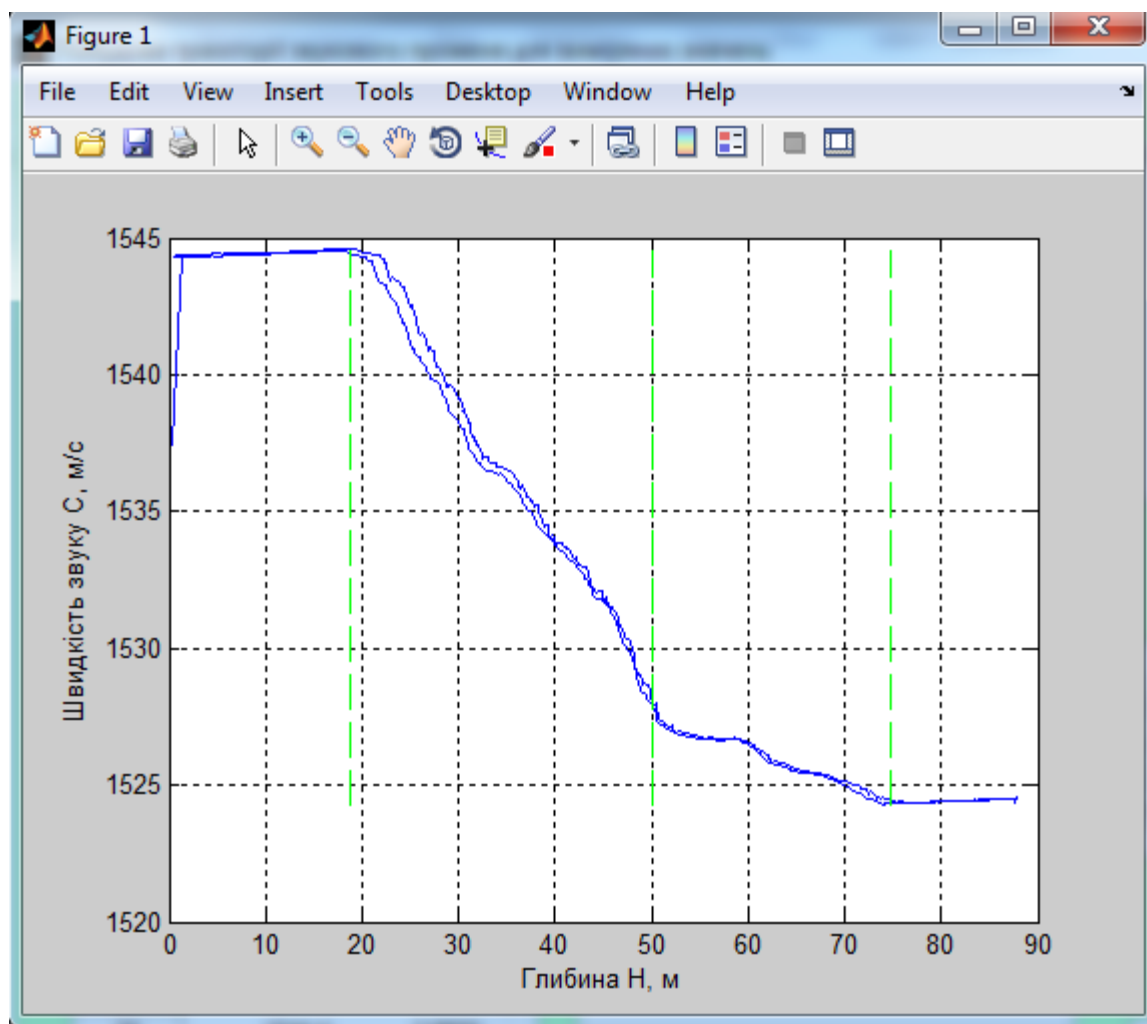


Рисунок 4.8 – Виділення ділянок з лінійною залежністю на профілі швидкості звуку

Параметри для побудови траєкторії

Градусна міра початкового кута  $Tet0$ , °

$Tet0 =$

Кількість відбиттів променя від поверхні

$n =$

Рисунок 4.9 – Введення параметрів для побудови траєкторії

Всі результати обчислень користувач може побачити у вигляді таблиці після того, як натисне кнопку “Побудувати таблицю водних шарів”. В результаті буде

отримана таблиця зображена на рисунку 4.10. В одержаній таблиці для кожного водного шару відображені значення початкової швидкості звуку, початкового кута, під яким звуковий промінь входить в водний шар, кінцевої глибини та градієнту зміни швидкості звуку за глибиною.

	H, м	C, м/с	Tet, °	k, 1/с
1	18.750	1544.3	85	-0.017281
2	50.110	1544.6	84.906	0.53131
3	74.810	1527.9	80.166	0.14279
4	87.830	1524.4	79.430	-0.0089862

Рисунок 4.10 – Таблиця з властивостями водних шарів

Для значень, які користувач задає в програмі, введена перевірка на числові значення. Наприклад, якщо користувач задасть нечислове значення для початкового кута випромінювання, то він отримає попередження про помилку зображене на рисунку 4.11.

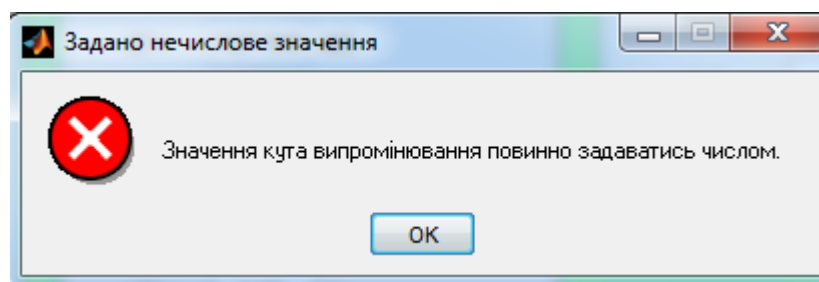


Рисунок 4.11 – Попередження про введення нечислового значення

Для відображення траєкторії потрібно натиснути кнопку “Побудувати траєкторію”. Відкриється нове вікно, в якому буде побудована траєкторія звукового променя відповідно до заданих параметрів. Для заданих значень, зображених на рисунку 4.9, траєкторія звукового променя матиме вигляд, зображений на рисунку 4.12. Звуковий промінь для кута випромінювання, який дорівнює  $85^\circ$ , проходить крізь перший водний шар, заломлюючись, потрапляє в другий, де по дузі кола повертається в перший шар. В першому водному шарі звуковий промінь з початковим радіусом дуги кола повертається до поверхні моря. Для даного випадку траєкторія звукового променя складається з трьох дуг кіл, при чому радіуси двох кіл є однаковими.

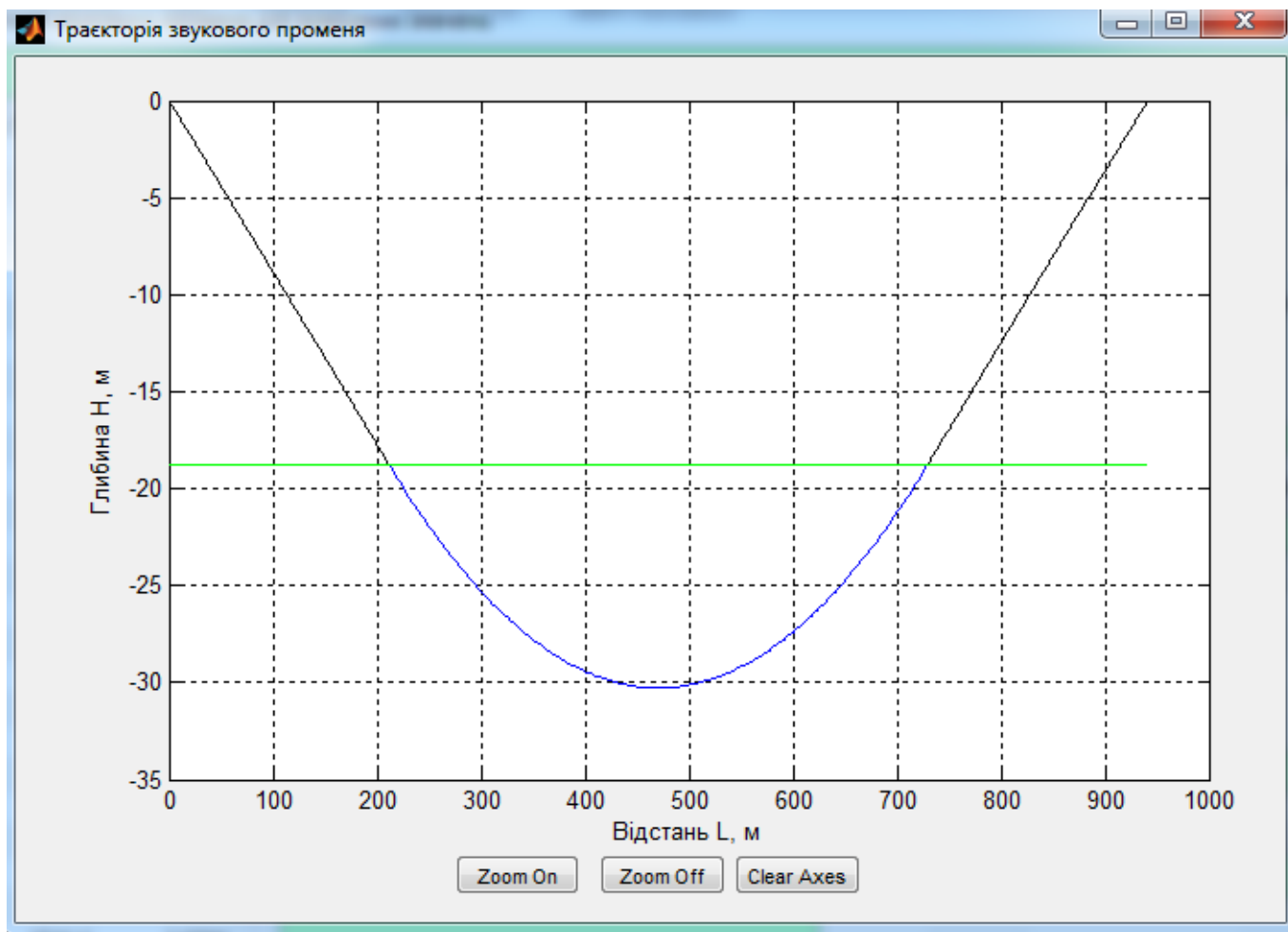


Рисунок 4.12 – Графічне вікно з побудованою траєкторією звукового променя

Остання панель елементів має назву “Відстань та глибина ГАС” (рисунок 4.13). За допомогою елементів даної панелі користувач може задавати розміщення гідроакустичної станції (ГАС).

Рисунок 4.13 – Введення відстані та глибини, на яких розміщується ГАС

Якщо задати в програмі початковий кут випромінювання рівним  $79.5^\circ$ , як показано на рисунку 4.14, то таблиця з властивостями водних шарів матиме вигляд зображений на рисунку 4.15. Якщо по черзі натиснути кнопки “Побудувати траєкторію” та “Позначити розміщення ГАС”, то отримаємо результат зображений на рисунку 4.16. Червоним кольором буде виділено точку знаходження ГАС. Як можна побачити на рисунку 4.16, звуковий промінь потрапив в ГАС.

Параметри для побудови траєкторії

Градусна міра початкового кута  $Tet0, ^\circ$

$Tet0 =$

Кількість відбиттів променя від поверхні

$n =$

Рисунок 4.14 – Введення кута випромінювання  $79.5^\circ$

	H, м	C, м/с	Tet, $^\circ$	k, 1/с
1	18.750	1544.3	79.500	-0.017281
2	50.110	1544.6	79.455	0.53131
3	74.810	1527.9	83.607	0.14279
4	87.830	1524.4	84.965	-0.0089862

Рисунок 4.15 – Таблиця з властивостями водних шарів для кута випромінювання  $79.5^\circ$

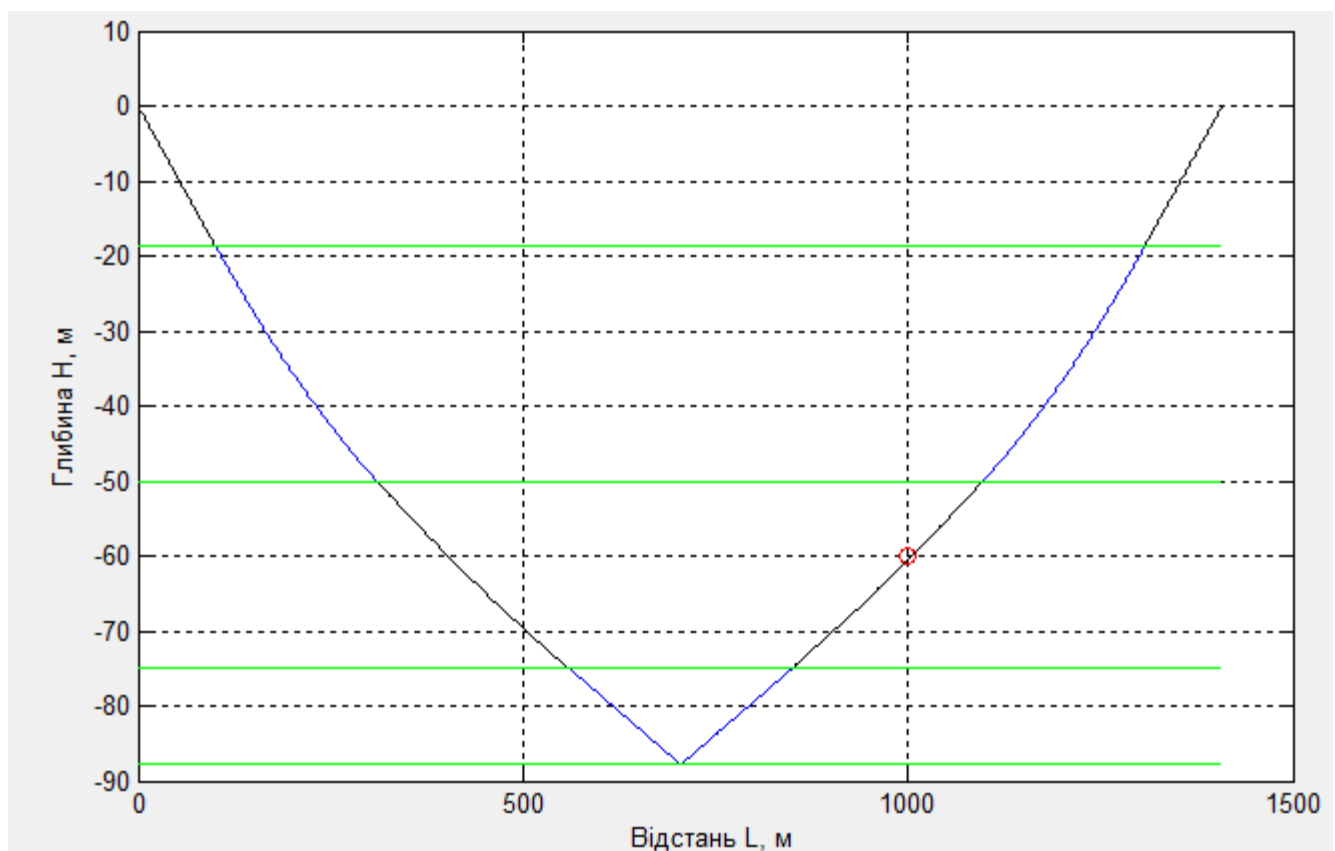


Рисунок 4.16 – Траєкторія звукового променя для кута випромінювання  $79.5^\circ$

Звуковий промінь, траєкторія якого зображена на рисунку 4.16, пройшов крізь всі 4 виділені водні шари, відбився від дна моря і потрапив в ГАС. Для побудови траєкторії даного звукового променя використовується алгоритм, блок-схема якого зображена на рисунку 4.17. Розрахунок градієнтів зміни швидкості звуку за глибиною, радіусів та центрів кіл для кожного водного шару проводиться за допомогою формул (3.9), (3.15), (3.16).

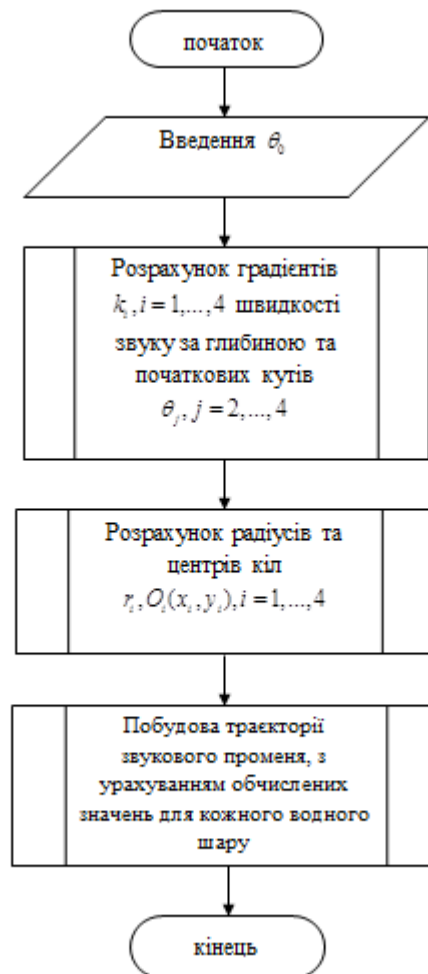


Рисунок 4.17 – Блок-схема алгоритму побудови траєкторії

Задаючи значення кутів випромінювання таким способом, щоб звуковий промінь влучив в ГАС, можна побудувати променеву картину зображену на рисунку 4.18. Задані кути випромінювання та побудовані траєкторії звукових променів, зображені на рисунку 4.18, є розв’язками доточкової крайової задачі, з наступними умовами:

- джерело звуку знаходиться на поверхні моря;

- гідроакустична станція розташована на відстані 1000 м та глибині 60 м від джерела звуку;
- водне середовище поділене на 4 водних шари, для кожного з яких є характерною лінійна залежність швидкості звуку від глибини занурення.

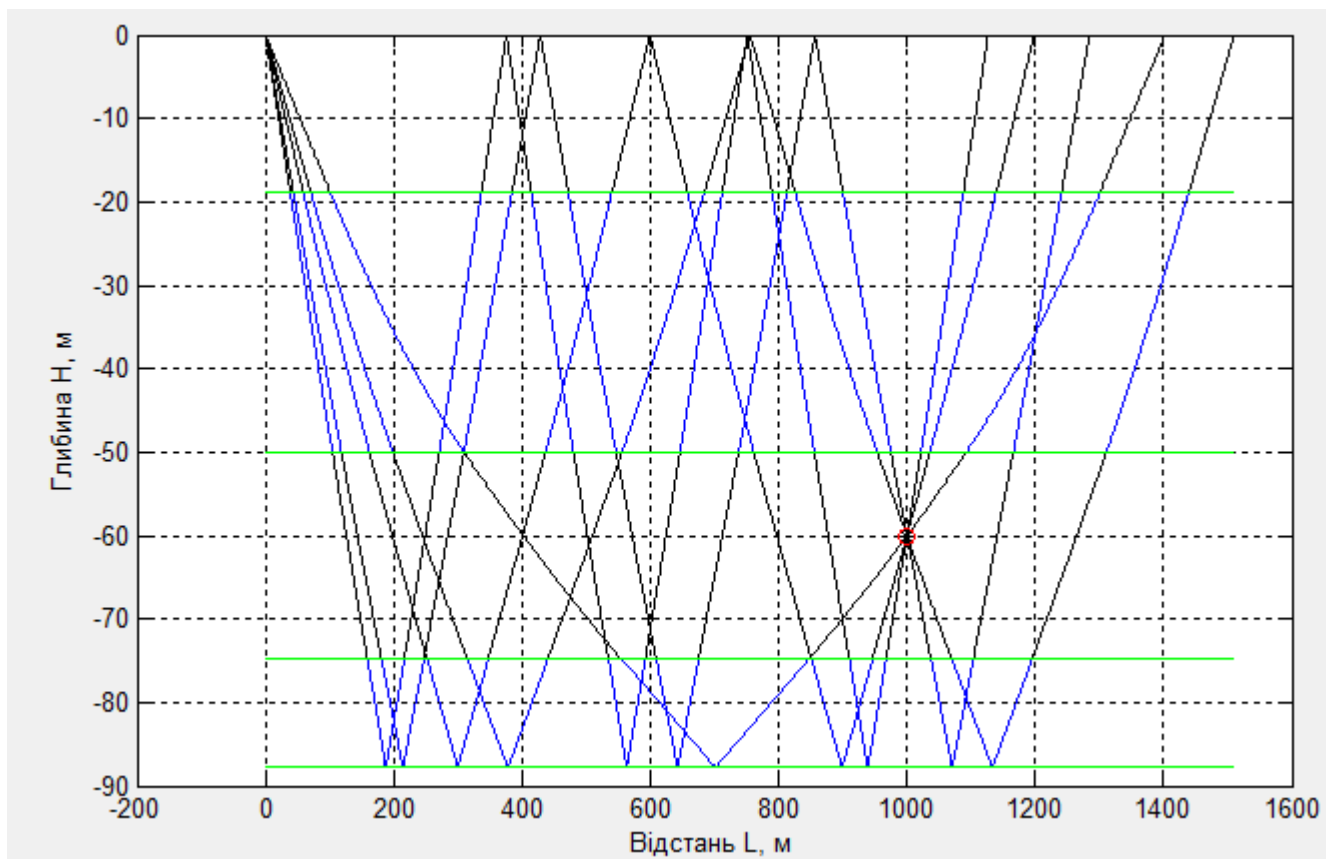


Рисунок 4.18 – Променева картина з попаданням звукових променів в ГАС

Користувач також має можливість відображати в одному полі не тільки декілька траєкторій звукових променів, а і декілька точок розміщення гідроакустичних станцій. Задамо кут випромінювання  $70^\circ$  та кількість відбиттів звукового променя від поверхні рівною двом. Спочатку задамо і відобразимо ГАС на відстані 800 м та глибині 80 м, а потім іншу ГАС на відстані від джерела звуку 1200 м та глибині 60 м. В результаті отримаємо результат зображений на рисунку 4.19. Звуковий промінь потрапить в обидві станції. Таким чином, ми можемо використовувати нашу побудовану геометричну модель розповсюдження звуку для знаходження, методом підбору, кутів випромінювання, при яких звукові промені будуть потрапляти в ГАС. Також, користувач програми має можливість задавати

розміщення ГАС так, щоб в неї влучив звуковий промінь з певним заданим кутом випромінювання.

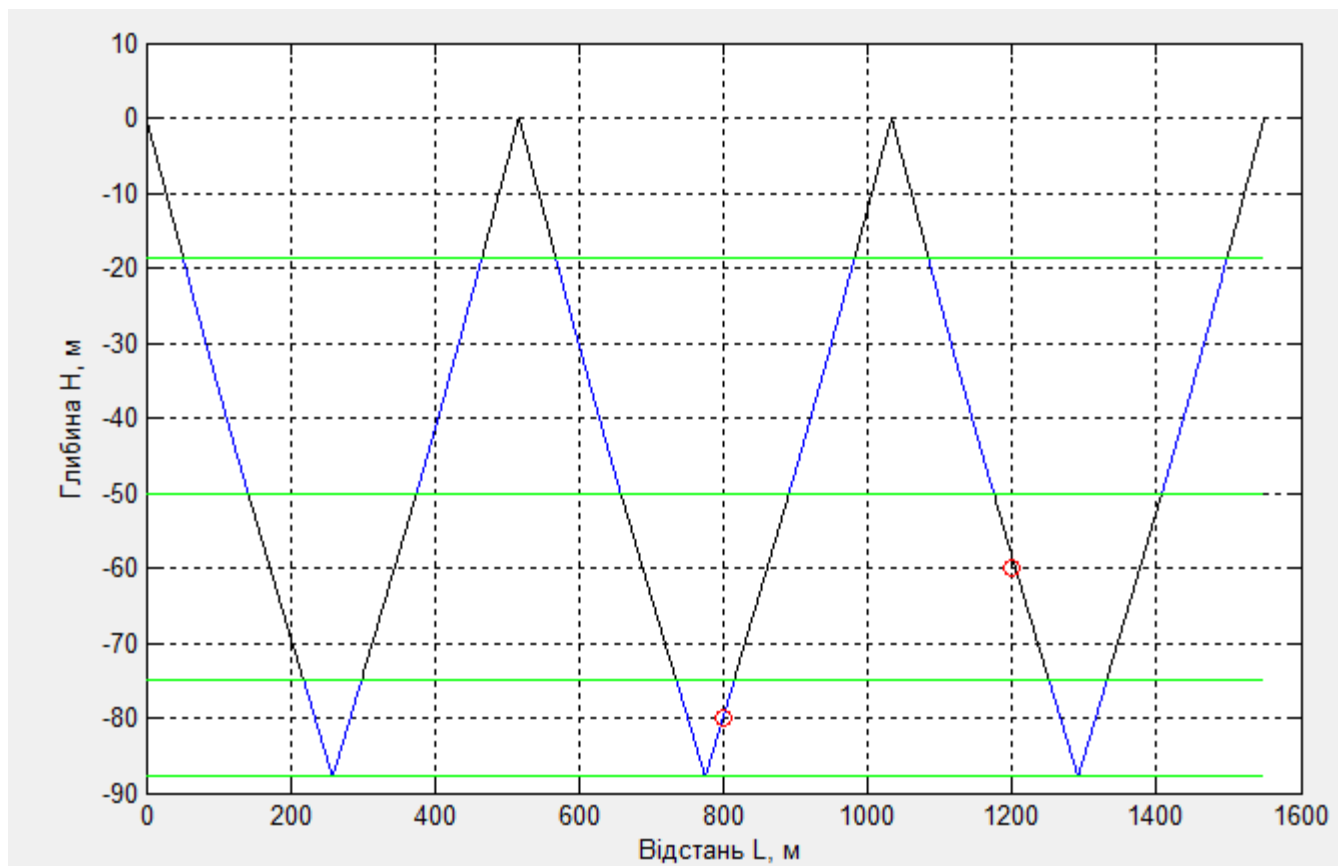


Рисунок 4.19 – Відображення двох гідроакустичних станцій

## 4.4 Висновки

1. Розроблений програмний продукт передбачає можливості перевірки методу спрощення формули Вільсона до вигляду полінома 2-го степеня за допомогою вимірних значень. В результаті даної перевірки одержана спрощена емпірична формула має меншу максимальну похибку, яка дорівнюватиме 0.327 м/с, ніж формула Вільсона, яка має максимальну похибку 0.376 м/с, порівняно з вимірними даними.

2. Інтерфейс програми дозволяє побудувати траєкторію звукового променя в залежності від значення кута випромінювання. При побудові траєкторії звукового променя враховується стратифікація водного середовища за швидкістю звуку.



3. Програмне забезпечення може бути використане для розв'язання доточної крайової задачі в гідроакустиці з наступними умовами:

- джерело звуку знаходиться на поверхні моря;
- гідроакустична станція розташована на заданій відстані та глибині від джерела звуку;
- водне середовище поділене на 4 водних шари, для кожного з яких є характерною лінійна залежність швидкості звуку від глибини занурення;
- необхідно знайти кут випромінювання, при якому звуковий промінь потрапить в ГАС.

## **5. РОЗРОБЛЕННЯ СТАРТАП-ПРОЕКТУ**

Обґрунтування стартап-проекту відбувається за наступною структурою: резюме проекту, організація проекту, канва бізнес-моделі [26], ключові види діяльності, ціннісні пропозиції та споживачі, взаємовідносини зі споживачами та канали збуту [27], обґрунтування ресурсів та витрат проекту, грошовий потік та оцінка вартості проекту.

### **5.1 Резюме проекту**

Ідея проекту полягає в створенні програмного забезпечення для побудови геометричної моделі розповсюдження звуку в водному середовищі, яка відображатиме залежність траєкторії звукового променя від початкового кута випромінювання, та використання створеної моделі для вирішення двоточної крайової задачі. Побудована геометрична модель враховує стратифікацію водного середовища за швидкістю звуку. Прибуток буде надходити від користування Web-сервісами з розміщеною базовою версією програмного забезпечення та за придбання повної версії. Початкові грошові вкладення в проект складають 42 000 грн., сума необхідних інвестицій за рік складає 300000 грн., прогнозований річний дохід 1200000 грн.. Повернення інвестицій відбувається протягом року з моменту їх отримання.

### **5.2 Організація проекту**

MWk – організація, що займається розробкою ПЗ для математичних розрахунків та імітаційного моделювання. Для даної організації проект є розширенням вже існуючого проекту, яке передбачає додання додаткового web-сервісу для обслуговування клієнтів.

### 5.3 Канва бізнес-моделі проекту

Канва бізнес-моделі проекту має вигляд таблиці 5.1.

Таблиця 5.1. Канва бізнес моделі

<b>(8) КЛЮЧОВІ ПАРТНЕРИ</b> <i>Компанія MWk – організація, що займається розробкою ПЗ для математичних розрахунків та імітаційного моделювання.</i>	<b>(4) КЛЮЧОВІ ВИДИ ДІЯЛЬНОСТІ</b> <i>Науково-технологічна діяльність</i>	<b>(5) ЦІННІСНІ ПРОПОЗИЦІЇ</b> <i>Побудова геометричної моделі відбувається для віртуального водного середовища, створеного на основі реальних вимірних показників властивостей морської води.</i>	<b>(6) ВЗАЄМОВІДНОСИНИ ЗІ СПОЖИВАЧАМИ</b> <i>Використання ПЗ можливе за допомогою Web-сервісу. Також є можливість завантаження однієї з версій ПЗ з мережі та установка її у вигляді додатку за відповідні кошти.</i>	<b>(5) СПОЖИВЧІ СЕГМЕНТИ</b> <i>Масовий ринок складають розробники гідкоакустичних моделей, які дуже часто стикаються з проблемою моделювання розповсюдження звуку в водному середовищі.</i>
	<b>(6) КЛЮЧОВІ РЕСУРСИ</b> <i>Технології розробки програмних продуктів. Команда молодих і перспективних працівників</i>		<b>(6) КАНАЛИ ЗБУТУ</b> <i>Непрямі канали розподілу</i>	
<b>(7) СТРУКТУРА ВИТРАТ</b> <i>Проект передбачає загальногосподарські витрати, витрати на матеріальні ресурси та витрати на оплату праці. Набільше витрат йде на оплату праці</i>			<b>(8) ПОТОКИ НАДХОДЖЕННЯ ДОХОДІВ</b> <i>В середньому грошовий потік за рік становить понад 600 тис.грн. Це дає змогу повертати кошти, які інвестуються в проект</i>	

### 5.4 Ключові види діяльності проекту

1. Вид проекту за характером інновації: запровадження нової технології для побудови геометричної моделі розповсюдження звуку в водному середовищі.
2. Спрямованість проекту: збільшення продуктивності та поліпшення умов праці.
3. Висновок щодо науково-технічного рівня ідеї: перевищує існуючі в Україні аналогічні розробки за окремими показниками.

4. Основні бізнес-процеси проекту наведені в таблиці 5.2.

Таблиця 5.2. Основні бізнес-процеси проекту

Група процесів	Бізнес-процес	Ступінь опрацювання бізнес-процесу	
		є реалізованим	буде реалізованим
Розробка продукції	розробка та конструювання продукції	+	
	розробка і конструювання процесу	+	
	технологічна підготовка виробництва	+	
Вимоги споживачів	дослідження розвитку ринку	+	
	організація маркетингу і продажів		+
	тендерне розміщення замовлень		+
Виконання замовлень	забезпечення і матеріально-технічний збут	+	
	планування і управління виробництвом		+
	виробництво продукції		+
	розподіл продукції і логістика		+
Обслуговування споживача	післяпродажне обслуговування		+
	повернення продукції		+

## 5.5 Ціннісні пропозиції та споживачі

1. Характер формування споживчої цінності проекту: покращення задоволення існуючих потреб, що виникають під час побудови гідроакустичних моделей.

2. Зміст ідеї проекту показано у вигляді таблиці 5.3.

3. Аналіз ідеї проекту наведений в таблиці 5.4.

4. Технологічний аудит ідеї проекту наведений в таблиці 5.5.

5. SWOT-аналіз проекту наведений в таблиці 5.6. Відповідно до SWOT-аналізу сильними сторонами проекту є відносно невеликий штат організації, молодий і перспективний колектив, гнучка політика керівництва, хороша репутація у клієнтів, порівняно недорогі технології, за допомогою яких розробляється продукт.

Таблиця 5.3. Зміст ідеї проекту

<i>Зміст ідеї</i>	<i>Напрямки застосування</i>	<i>Сегменти споживачів</i>	<i>Цінність для споживачів</i>
Розробити ПЗ для побудови геометричної моделі розповсюдження звуку в водному середовищі, яка відображатиме залежність траєкторії звукового променя від початкового кута випромінювання, та використання створеної моделі для вирішення двоточкової крайової задачі.	Розробка гідроакустичних моделей	Масовий ринок	Врахування стратифікації водного середовища за швидкістю звуку.

Таблиця 5.4. Аналіз ідеї проекту

№	<i>Техніко-економічні характеристики ідеї</i>	<i>Продукція конкурентів</i>		<i>W (слабка сторона)</i>	<i>N (нейтральна сторона)</i>	<i>S (сильна сторона)</i>
		<i>Мій проект</i>	<i>Конкуруючий проект</i>			
1.	Врахування стратифікації водного середовища за швидкістю звуку	Водне середовище стратифікується за швидкістю звуку	Водне середовище немає поділу на окремі частини			+
2.	Залежність траєкторії звукового променя від кута випромінювання	Кривизна траєкторії звукового променя залежить від кута випромінювання	Траєкторія звукового променя залежить від кута випромінювання, але він не впливає на її кривизну			+

Таблиця 5.5. Технологічний аудит ідеї проекту

№	<i>Ідея проекту</i>	<i>Технології її реалізації</i>	<i>Наявність технологій</i>	<i>Доступність технологій</i>
1.	Створення ПЗ	Технології створення системи геометричного моделювання	наявна	доступна
2.	Надання послуги	Web-технології	наявна	доступна
<i>Обрана технологія реалізації ідеї проекту: Технологія створення системи геометричного моделювання з урахуванням надання послуг через Web-сервіс</i>				

Таблиця 5.6. SWOT-аналіз проекту

<p><i>Сильні сторони (S):</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- відносно невеликий штат організації</li> <li>- молодий і перспективний колектив</li> <li>- гнучка політика керівництва</li> <li>- хороша репутація у клієнтів</li> <li>- порівняно недорогі технології, за допомогою яких розробляється продукт</li> </ul>	<p><i>Слабкі сторони (W):</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- невеликий офіс</li> <li>- недостатньо високий прибуток</li> <li>- порівняно невеликий обсяг наявних ресурсів</li> </ul>
<p><i>Можливості (O):</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- збільшення кількості послуг, що здійснюються ПЗ</li> <li>- вихід на нові ринки</li> <li>- використання рекламних технологій для збільшення кількості споживачів</li> </ul>	<p><i>Загрози (T)</i></p> <p>:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- поява нових конкурентів</li> <li>- зростаючий конкурентний тиск</li> <li>- зниження репутації</li> <li>- збільшення цін на технології, що використовуються при розробці</li> <li>- банкрутство</li> </ul>

## 5.6 Взаємовідносини між споживачами та канали збуту

Взаємовідносини між споживачами та канали збуту описані в таблиці 5.7.

Таблиця 5.7. Взаємовідносини між споживачами та канали збуту

№	Сегмент споживачів	Особливості поведінки	Вимоги споживачів	Канали збуту	Інші аспекти взаємовідносин
1.	Масовий ринок	Використання ПЗ можливе за допомогою Web-сервісу. Також є можливість завантаження однієї з версій ПЗ з мережі та установка її у вигляді додатку за відповідні кошти.	Якісне ПЗ, яке не дає збоїв в роботі. Можливість збереження результатів своєї роботи для подальшого їх використання.	Непрямі канали розподілу – ПЗ надається через посередника	

## 5.7 Обґрунтування ресурсів та витрат проекту

## 1. Визначення ціни наведено в таблиці 5.8

Таблиця 5.8. Визначення ціни

№	Рівень цін на товари-замінники	Рівень цін на товари-аналоги	Рівень доходів цільової групи споживачів	Верхня та нижня межі встановлення ціни на продукцію	Розрахункова ціна продукції
1.	12000 грн.	12000 грн.	15000 грн.	9758 грн. – 14763 грн.	12500 грн.

## 2. Визначення обсягу виробництва продукції наведено в таблиці 5.9

Таблиця 5.9. Визначення обсягу виробництва продукції

Показник	Значення по роках				
	2018	2019	2020	2021	2022
Загальна потреба в продукції	100	90	80	90	80
Можливі річні обсяги випуску в натуральних показниках	100	100	100	100	100
Ціна одиниці продукції (тис. грн.)	12,5	12	12	12	12
Річні обсяги випуску в вартісних показниках (тис. грн.)	1250	1200	1200	1200	1200

## 3. Розрахунок загальних початкових інвестиційних витрат наведено в таблиці 5.10.

Таблиця 5.10. Розрахунок загальних початкових інвестиційних витрат

№	Назва етапу	Терміни виконання	Обсяги фінансування, тис. грн.
1.	Проведення досліджень	26.01-11.03	2
2.	Розробка або придбання технології	7.02-2.05	5
3.	Придбання устаткування	13.02-19.03	10
4.	Організація діяльності та запуск проекту	1.04-23.07	5
5.	Витрати на управління	1.04-14.08	5
6.	Початкові виробничі витрати	26.01-30.10	15
7.	Інші витрати	-	-
Разом		26.01-30.12	42

## 4. Розрахунок виробничих витрат наведено в таблиці 5.11.

Таблиця 5.11. Розрахунок виробничих витрат

№ з/п	Стаття витрат	Сукупні витрати за період, тис. грн.				
		2018	2019	2020	2021	2022

1.	Загальногосподарські витрати	204	204	204	204	204
1.1.	витрати на оренду та утримання приміщень, обладнання	120	120	120	120	120
1.2.	комунальні витрати	36	36	36	36	36
1.5.	витрати на збут, просування та рекламу	48	48	48	48	48
2.	Витрати на матеріальні ресурси (комплектуючі, сировина)	10	12	11	9	10
3.	Витрати на оплату праці	300	320	310	315	305
4.	Інші витрати (якщо є)	-	-	-	-	-
<i>Разом:</i>		514	536	525	528	519

5. Розрахунок загальних витрат на реалізацію проекту по роках наведено в таблиці 5.12.

Таблиця 5.12. Розрахунок загальних витрат на реалізацію проекту по роках

Показник	Значення по роках					Разом
	2018	2019	2020	2021	2022	
Інвестиційні витрати, тис. грн.	42	42	42	42	42	210
Виробничі витрати, тис. грн.	514	536	525	528	519	2622
Обсяг загальних витрат, в тому числі за рахунок, тис. грн.	556	578	567	570	561	2832
– власних коштів, тис. грн.	250	260	270	260	250	1290
– коштів інвестора, тис. грн.	306	318	297	310	311	1542

## 5.8 Грошовий потік та оцінка вартості проекту

1. Формування грошового потоку від реалізації проекту наведено в таблиці 5.13.

2. Розрахунок вартості проекту наводиться в таблиці 5.14, в якій декількома методами проводиться оцінка вартості проекту з точки зору інвестора. До методів, за допомогою яких проводиться оцінка, належать метод мультиплікаторів [28], ROV-метод [29, 30], “хокейної ключки”, перший чиказький метод, скорингу [31].

Таблиця 5.13. Формування грошового потоку від реалізації проекту

№	Показник	Значення по роках, тис. грн.	Разом
---	----------	------------------------------	-------



		2016	2017	2018	2019	2020	2021	
1.	Надходження від проекту (виручка від реалізації продукції, послуг) (D)	1200	1200	1250	1200	1200	1200	7250
2.	Загальні витрати (I), в тому числі	556	561	556	578	567	570	3388
3.	Грошовий потік ( $3 = 1 - 2$ ) (CF)	644	639	694	622	633	630	3862
4.	Акумуляований грошовий потік (ACF)	644	1283	1977	2599	3232	3862	-

Таблиця 5.14. Розрахунок вартості проекту

Найменування методу	Умови застосування	Отримана оцінка	Частка венчурного інвестора	Рішення щодо інвестування в проект
Метод мультиплікаторів	Стартап перебуває на завершальній стадії розробки	300 тис. грн.	10%	Інвестувати
ROV-метод	Стартап перебуває на завершальній стадії розробки	305 тис. грн.	10%	Інвестувати
Метод «хокейної ключки»	Стартап перебуває на завершальній стадії розробки	300 тис. грн.	10%	Інвестувати
Перший чиказький метод (FCM)	Стартап перебуває на завершальній стадії розробки	310 тис. грн.	10%	Інвестувати
Метод скорингу	Стартап перебуває на завершальній стадії розробки	300 тис. грн.	10%	Інвестувати

## 5.9 Висновки

1. Проект з реалізації ПЗ для побудови геометричної моделі розповсюдження звуку в водному середовищі є доцільним, привабливим та ефективним для стартапера та інвестора.

2. Доходи від продажу програмного забезпечення значно переважають витрати. Це дає змогу повертати кошти, які інвестувалися в проект.

## ВИСНОВКИ

1. На основі математичного аналізу виведено формули залежності траєкторії звукового променя від початкових значень швидкості звуку та кута випромінювання.

2. Виведено загальний вигляд рівняння кола, дугою якого є частина траєкторії звукового променя, що проходить крізь водний шар з лінійною залежністю швидкості звуку від глибини.

3. Набуло подальшого розвитку застосування методу побудови траєкторії звукового променя для стратифікованого за швидкістю звуку водного середовища, за рахунок застосування даного методу до реальних даних, одержаних в результаті проведення експерименту з вимірювання швидкості звуку.

4. Створено геометричну модель розповсюдження звуку в водному середовищі, яка відображає залежність траєкторії звукового променя від початкового кута випромінювання, з урахуванням поділу водного середовища на 4 водні маси.

5. Засобами програмного середовища MATLAB розроблений програмний продукт, який передбачає можливості перевірки методу спрощення формули Вільсона до вигляду полінома 2-го степеня за допомогою виміряних значень. В результаті даної перевірки одержана спрощена емпірична формула має меншу максимальну похибку, яка дорівнюватиме 0.327 м/с, ніж формула Вільсона, яка має максимальну похибку 0.376 м/с, порівняно з виміряними даними.

6. Інтерфейс розробленої програми дозволяє побудувати траєкторію звукового променя в залежності від значення кута випромінювання. При побудові траєкторії звукового променя враховується стратифікація водного середовища за швидкістю звуку.

7. Програмне забезпечення може бути використане для розв'язання доточкової крайової задачі в гідроакустиці з наступними умовами:

- джерело звуку знаходиться на поверхні моря;

- гідроакустична станція розташована на заданій відстані та глибині від джерела звуку;
- водне середовище поділене на 4 водних шари, для кожного з яких є характерною лінійна залежність швидкості звуку від глибини занурення;
- необхідно знайти кут випромінювання, при якому звуковий промінь потрапить в ГАС.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Клюкин И.И. Звук и море. 2-е изд., перераб. и доп. – Л.: Судостроение, 1984 – 144 с.
2. Урик Роберт Дж. Основы гидроакустики / Пер. с англ. – Л.: Судостроение, 1978. – 448 с.
3. Евтютов А.П., Колесников А.Е., Ляликов А.П. и др. Справочник по гидроакустике. – Л.: Судостроение, 1982. – 344 с.
4. Del Grosso V.A. New equation for the speed of sound in natural waters (with comparisons to other equations) / V.A. Del Grosso // J. Acoust. Soc. Amer. – 1974. – Vol. 56. – No. 4. – P. 1084-1091.
5. Wilson W. D. Equation for the speed of sound in sea water.-J. Acoust. Soc. Amer., 1960, vol.32, N 10, p. 1357.
6. Leroy C.C. A new equation for the accurate calculation of sound speed in all oceans / C.C. Leroy, S.P. Robinson, M.J. Goldsmith // J. Acoust. Soc. Am. – 2008. – 124. – No. 5. – P. 2774-2782.
7. Бабий В.И. Проблемы и перспективы измерения скорости звука в океане/ В.И. Бабий. – Севастополь: НППЦ«ЭКОСИ-Гидрофизика», 2009. – 142 с.
8. Сташкевич А.П. Акустика моря / А.П. Сташкевич. – Л.: Судостроение, 1966. – 354 с.
9. Бреховских Л. М. Волны в слоистых средах. 2-е изд. – Москва: Изд-во «Наука», 1973. – 343 с.
10. Адлер Ю. П. Введение в планирование эксперимента / Адлер Ю. П. — Москва: Изд-во «Металлургия», 1968. — 155 с.
11. Подводная акустика и обработка сигналов: Пер. с англ./Под ред. Л.Бьёрнё. – М.: Мир, 1985, 488 с.
12. Фирсов Ю.Г. "Основы гидроакустики и использования гидрографических сонаров" — СПб.: Нестор-История, 2010. — 348 с.
13. Асатурян В.И. Теория планирования эксперимента. – М.: Радио и связь, 1983.
14. Налимов В.В. Теория эксперимента. – М.: Наука, 1971.

15. Математическая теория планирования эксперимента./Под ред. С.М. Ермакова.-М.:Наука. Физматгиз, 1983.-392 с.
16. Линник Ю. В. Метод наименьших квадратов и основы математико-статистической теории обработки наблюдений. — 2-е изд. — М., 1962.
17. Турчак Л. И – Основы численных методов / Л. И. Турчак. – М: Физматлит, 2005. – 304 с.
18. Угинчус А. А. Гидравлика и гидравлические машины. 3-е перераб. и доп. изд. – Харьков: Издательство Харьковского Государственного университета имени А. М. Горького, 1966. – 400 с.
19. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. – Москва: Наука, 1973. – 720 с.
20. Дубовик В.П. Вища математика: навч. посіб. для студ. вищ. навч. закл. / В.П. Дубовик, І.І. Юрик. – 4-те вид. – К. : Ігнатекс-Україна., 2013. - 648 с.
21. Письменный Д.Т. Конспект лекций по высшей математике: полный курс / Д.Т. Письменный. – 4-е изд. – М.: Айрис-пресс, 2006. – 608 с.
22. Забара С.С., Гагарін О.О., Кузьменко І.М., Щербашин Ю.Д. Моделювання систем в середовищі MATLAB. –К.: Університет «Україна», 2011. -137с.
23. Дьяконов В. П. MATLAB. Полный самоучитель./ Дьяконов В.П. — М.: ДМК Пресс, 2012. — 768 с.
24. Кетков Ю.Л., Кетков А.Ю., Шульц М.М. MATLAB 6.x.: программирование численных методов. – СПб.: БХВ-Петербург, 2004. – 672 с.
25. Ануфриев И.Е., Смирнов А.Б., Смирнова Е.Н. MATLAB 7. Наиболее полное руководство в подлиннике / Ануфриев И.Е., Смирнов А.Б., Смирнова Е.Н. — СПб.: БХВ-Петербург, 2005. — 1104 с.
26. Маллинс, Дж. Поиск бизнес-модели: как спасти стартап, вовремя сменив план / Дж. Маллинс, Р. Комисар ; пер. с англ. М. Пуксанти и Е. Бакушевой. — Москва: Манн, Иванов и Фербер, 2012. — 329 с.
27. Бланк, С. Стартап. Настольная книга основателя / С. Бланк, Б. Дорф ; пер. с англ. Т. Гутман, И. Окунькова, Е. Бакушева. — 2-е изд. — Москва : Альпина Паблишер, 2014. — 614 с.

28. Рогова Е.М., Ткаченко Е.А., Фияксель Э.А. Венчурный менеджмент. – М.: Издательство: Высшая Школа Экономики, 2011 г. – 500 с. / ISBN: 978-5-7598-0746-9.
29. Лимитовский М.А. Инвестиционные проекты и реальные опционы на развивающихся рынках: Учеб.-практич. пособие. – М.: Дело, 2004. – 528 с.
30. Antikarov V., Copeland T. Real Options: A Practitioner's Guide. Texere LLC Publishing, New York, 2001.
31. 9 методов оценки стартапа [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.iidf.ru/media/articles/money/9-metodov-otsenki-startapa-s-kommentariyami/>

## ДОДАТОК А

Геометрична модель розповсюдження звуку в водному середовищі

Апробація

УКР.НТУУ “КПІ” ім. І. Сікорського. ТР31359\_18М

Аркушів 4

2018

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ ІМЕНІ ІГОРЯ  
СІКОРСЬКОГО»

# СУЧАСНІ ПРОБЛЕМИ НАУКОВОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЕНЕРГЕТИКИ

Матеріали XVI Міжнародної  
науково-практичної конференції  
аспірантів, магістрантів і студентів  
м. Київ, 24-27 квітня 2018 року,

ТОМ 2



Київ- 2018



<i>МЕЛЬНИЧЕНКО А.В., студент гр. ТВ-41</i>	
<i>Керівник - доц., к.т.н. Крамар Ю.М.</i>	
<b>Моделювання акустичного сигналу для дна з постійним кутом нахилу.</b>	209
<i>ПЕТРОВСЬКИЙ С.І., студент гр. ТВ-41</i>	
<i>Керівник - ст.викл. Васильєва О.Б.</i>	
<b>Керуючий модуль системи моделювання гідроакустичних сигналів.</b>	210
<i>ПЕТРОВСЬКИЙ С.І., студент гр. ТВ-41</i>	
<i>Керівник - ст.викл. Васильєва О.Б.</i>	
<b>Генерація сигналу рухомого морського об'єкта з використанням променевої моделі для дна зі змінним кутом нахилу.</b>	211
<i>РОМАНОВ О.В., студент гр. ТВ-41</i>	
<i>Керівник - ст.викл. Васильєва О.Б.</i>	
<b>Генерація акустичного сигналу з використанням променевої моделі та врахуванням температурного й сольового профілів.</b>	212
<i>РУЩАКОВ О.В., студент гр. ТВ-41</i>	
<i>Керівник - ст.викл. Васильєва О.Б.</i>	
<b>Обробка текстового контенту за допомогою кластерних систем.</b>	213
<i>СЕРБІН А.В., студент гр. ТІ-41</i>	
<i>Керівник - ст.викл. Ляшенко М.В.</i>	
<b>Система енергетичного менеджмента на промисловому підприємстві.</b>	214
<i>ШКЛЯРСЬКИЙ Н.О., студент гр. ТР-41</i>	
<i>Керівник - доц., к.т.н. Тарнавський Ю.А.</i>	
<b>Задача ідентифікації морських об'єктів за параметрами гідроакустичної хвилі з використанням нейронних мереж.</b>	215
<i>ЮЩЕНКО М.О., студент гр. ТВ-42</i>	
<i>Керівник - ст.викл. Васильєва О.Б.</i>	
<b>Використання методу планованого експерименту на прикладі спрощення формули Вільсона.</b>	216
<i>ЄВТУШЕНКО А.М., студент гр. ТР-41</i>	
<i>Керівник - доц., к.т.н. Щербашин Ю.Д.</i>	
<b>Побудова динамічних реєстрів електронних інформаційних ресурсів кафедри в ASP.NET.</b>	217
<i>ІВАНЮК А.О., студент гр. ТВ-42</i>	
<i>Керівник - ст.викл. Васильєва О.Б.</i>	
<b>Температурне поле в циліндрі при односторонньому нагріванні.</b>	218
<i>БАТІН О.О., студент гр. ТМ-62</i>	
<i>Керівник - ст.викл. Молодід О.К.</i>	
<b>Про одну систему ортогональних функцій та її застосування.</b>	219
<i>ГОРОДЕЦЬКИЙ М.В., студент гр. ТР-62</i>	
<i>Керівник - ст.викл. Молодід О.К.</i>	
<b>Температурне поле в циліндрі при термоізоляції.</b>	220
<i>КОЛОМОЄЦЬ І.М., студент гр. ТМ-62</i>	
<i>Керівник - ст.викл. Молодід О.К.</i>	
<b>Температурне поле в циліндрі при конвективному охолодженні його кінців.</b>	221
<i>МИХАЛЬКО В.Г., студент гр. ТМ-62</i>	
<i>Керівник - ст.викл. Молодід О.К.</i>	
<b>СЕКЦІЯ №9 Сучасні проблеми сталого розвитку енергетики</b>	222
<b>Проблема семантичної узгодженості даних.</b>	223
<i>ГОРБ П.Ю., аспірант</i>	

УДК 621.43.056

Студент 4 курсу, гр. ТР-41 Євтушенко А.М.

Доц., к.т.н. Щербашин Ю.Д.

## ВИКОРИСТАННЯ МЕТОДУ ПЛАНОВАНОГО ЕКСПЕРИМЕНТУ НА ПРИКЛАДІ СПРОЩЕННЯ ФОРМУЛИ ВІЛЬСОНА

Система багатфакторних формул, теоретичних та емпіричних, складає математичну модель об'єкту, що досліджується або проектується, на якій можна вирішувати задачі оптимального проектування та управління. Для складання емпіричних формул по експериментальним даним використовується математична теорія планування експерименту [1]. В роботі розглядається отримання спрощених емпіричних формул - швидкості (с) звуку в морській воді - функції 3-х незалежних факторів: S-солоності, P- гідростатичного тиску та T- температури морської води.

Для розрахунку швидкості звуку використовується формула Вільсона [2]. Для полегшення її використання, вона спрощується за допомогою методів планування експерименту та проводиться дослідження адекватності її спрощеного варіанту, що виражається через величину максимального відхилення між значеннями формули Вільсона та її спрощеними варіантами. Спочатку будується матриця ротатбельного центрального композиційного планування (ЦКП) другого порядку для трьох факторів. Ядром плану є повний факторний експеримент (ПФЕ) вигляду  $2^3$ . Зіркові точки плану розташовуються на сфері нормованого 3D-простору радіусом  $r=1.682$  та мають координати  $(1.682;0;0)$ ,  $(0;1,682;0)$ ,  $(0;0;1.682)$ . План містить 15 точок та є ненасиченим – кількість оцінюваних коефіцієнтів дорівнює 10. Отриману матрицю використаємо для пошуку коефіцієнтів поліному методом найменших квадратів (МНК). Таким способом знайдемо поліном другого порядку, який і буде спрощеним варіантом формули Вільсона. Візьмемо крайні точки трьох факторів: температура  $T1=-4^{\circ}\text{C}$  та  $T2=30^{\circ}\text{C}$ , солоність  $S1=0\%$  та  $S2=37\%$ , гідростатичний тиск  $P1=0.1\text{МПа}$  та  $P2=100\text{МПа}$ . Відповідно центральна точка плану має координати  $(13;18.5;50.05)$ . Після застосування МНК одержимо поліном  $c=1401.2095+4.806\cdot T+1.3121\cdot S+1.723\cdot P-0.011187\cdot T\cdot S-0.0037742\cdot T\cdot P-0.00055024\cdot S\cdot P-0.035499\cdot T^2+0.0011752\cdot S^2+0.00026107\cdot P^2$ . Максимальне відхилення отриманої формули порівняно з формулою Вільсона досягає 3.39 м/с, тобто незадовільне. Для покращення адекватності одержаного полінома, розіб'ємо область на підобласті. Нижче наведені результати для декількох отриманих підобластей.

1) Мілке (190 м глибини) зимове море:  $T1=-4$ ,  $T2=8$ ;  $S1=34$ ,  $S2=36$ ;  $P1=0.1$ ,  $P2=2.0$ . В даному випадку одержимо поліном  $c=1396.1568+4.9527\cdot T+1.6309\cdot S+1.6209\cdot P-0.01124\cdot T\cdot S-0.0016246\cdot T\cdot P+0.00075837\cdot S\cdot P-0.045146\cdot T^2-0.0033263\cdot S^2-0.0045345\cdot P^2$ . Максимальне відхилення отриманої формули порівняно з формулою Вільсона досягає 0.053 м/с.

2) Мілке літнє море:  $T1=20$ ,  $T2=28$ ;  $S1=34$ ,  $S2=36$ ;  $P1=0.1$ ,  $P2=0.4$ . В цьому випадку одержимо поліном  $c=1405.2756+4.5298\cdot T+1.3485\cdot S+1.5728\cdot P-0.011206\cdot T\cdot S+0.0025611\cdot T\cdot P+0.00079588\cdot S\cdot P-0.035361\cdot T^2+0.00070043\cdot S^2-0.043524\cdot P^2$ . Максимальне відхилення отриманої формули досягає 0.031м/с.

3) Мілке літнє море в гирлах річок:  $T1=20$ ,  $T2=28$ ;  $S1=10$ ,  $S2=34$ ;  $P1=0.4$ ,  $P2=2.0$ . Одержуємо поліном  $c=1406.5404+4.5253\cdot T+1.2794\cdot S+1.5562\cdot P-0.011205\cdot T\cdot S+0.0025135\cdot T\cdot P+0.00077031\cdot S\cdot P-0.035267\cdot T^2+0.0016851\cdot S^2-0.0008309\cdot P^2$ . Максимальне відхилення 0.032м/с.

З одержаних результатів можна дійти висновку, що розгляд всієї області значень параметрів приводить до недопустимо великої величини відхилення. Але адекватність отриманої формули можна значно підвищити за рахунок розбиття всієї області на окремі підобласті.

Перелік посилань:

1. Адлер Ю. П. «Введение в планирование эксперимента» - Москва: Изд-во «Металлургия», 1968.
2. [http://www.akin.ru/spravka/s\\_i\\_svel.htm](http://www.akin.ru/spravka/s_i_svel.htm)

## **ДОДАТОК Б**

### **Акт впровадження**

**Геометрична модель розповсюдження звуку в водному середовищі**